

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tamara Škec

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić, dipl. ing.

Student:

Tamara Škec

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Davoru Zvizdiću bez kojeg ovog rada ne bi bilo. Također se zahvaljujem dr. sc. Danijelu Šestanu na mnogim korisnim savjetima i pomoći pri skupljanju literature.

Tamara Škec

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	8
POPIS TABLICA.....	9
POPIS OZNAKA.....	10
SAŽETAK.....	12
1. UVOD	13
2. TRENUTAČNA ORGANIZACIJA HRVATSKOG NACIONALNOG MJERITELJSKOG SUSTAVA	15
2.1. Državni zavod za mjeriteljstvo.....	15
LABORATORIJI NOSITELJI NACIONALNIH ETALONA	15
HRVATSKA AKREDITACIJSKA AGNECIJA (HAA)	15
HRVATSKI ZAVOD ZA NORME (HZN)	16
HRVATSKI LABORATORIJ, CROLAB.....	17
HRVATSKO MJERITELJSKO DRUŠTVO	17
3. VLAŽNOST	19
3.1. Uvod	19
3.2. Apsolutna vlažnost	19
3.3. Omjer mješavine ili omjer vlažnosti	20
3.4. Relativna vlažnost.....	20
3.5. Specifična vlažnost	21
3.6. Vlažnost i gustoća zraka	21
3.7. Mjerenje i reguliranje vlažnosti.....	21
4. MJERENJE RELATIVNE VLAŽNOSTI.....	22
4.1. Uvod	22
4.2. Mjerenje relativne vlažnosti pomoću temperature točke rose	22
4.3. Psihrometar	23
4.4. Higrometri s vlaknima	24
4.5. Optički pretvornici vlage	24
4.6. Kapacitivni pretvornici vlage	25
4.7. Pretvornici vlage sa samozagrijavanjem i elektrolitski pretvornici	27
4.8. Piezoelektrični pretvornici vlage	27
4.9. Određivanje vlage i mokrine mjerenjem apsorpcije infracrvenog zračenja	28
5. METODE UMJERAVANJA MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI I HIGROMETARA TOČKE ROSE	30
5.1. Uvod	30
5.2. Umjeravanje generatorom točke rose (dew-point generation, dp _g).....	30

5.3. Usporedbeno umjeravanje mjerenjem temperature točke rose (dew-point measurement, dpm)	30
5.4. Umjeravanje mjerenjem temperature točke rose i ispitnih temperatura	31
5.5. Metoda umjeravanja generiranjem relativne vlažnosti	33
6. GENERATORI RELATIVNE VLAŽNOSTI	34
6.1. Uvod	34
6.2. Način rada generatora vlažnosti.....	35
6.3. Niskotemperaturni generator vlažnosti – NGV	36
6.4. Visokotemperaturni generator vlažnosti – VGV.....	39
6.5. Opis klimatske komore generatora vlažnosti	40
7. POSTUPAK UMJERAVANJA HIGROMETARA TOČKE ROSE	42
7.1. Priprema	42
7.2. Vizualni pregled ispitivanog uređaja	42
7.3. Mjerne točke kod umjeravanja higrometara točke rose.....	42
7.4. Priprema generatora	42
7.5. Protoci zraka	42
7.6. Tlakovi	43
7.7. Zahtjevi za cijevi i priključke	43
7.8. Priprema IU-a, kontrolnog uređaja ili referentnog higrometra	44
7.9. Postupak umjeravanja.....	44
8. POSTUPAK UMJERAVANJA MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI	46
8.1. Uvod	46
8.2. Matematičke osnove	46
8.3. Vizualni pregled ispitivanog uređaja	46
8.4. Mjerne točke kod umjeravanja mjerila relativne vlažnosti.....	47
8.5. Postupak umjeravanja.....	47
9. PROJEKT TLAČNOG SUSTAVA ZA PRIPREMU, SUŠENJE I MJERENJE PROTOKA PLINA NA GENERATORU	50
9.1. Uvod	50
10. PROJEKT KONDENZATORA ZA SUŠENJE ZRAKA	52
10.1. Uvod	52
10.2. Potrebna ukupna snaga kondenzatora	52
10.3. Proračun kondenzatora	53
10.3.1. Rezultati proračuna	56
10.4. Implementacija kondenzatora (pločastog izmjenjivača) u sustav.....	57

10.5. Opis sustava hlađenja struje vode.....	60
10.5.1. Proračun potrebne snage termoelektričnog hladila	60
11. ZAKLJUČAK.....	64
LITERATURA.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1 Prikaz organizacije hrvatskog nacionalnog mjeriteljskog sustava	18
Slika 2 Mjerenje relativne vlažnosti pomoću temperature točke rose	23
Slika 3 Optički pretvornik u valjkastoj izvedbi	24
Slika 4 Optički pretvornik u pločastoj izvedbi.....	25
Slika 5 Senzor mjerenja impedancije.....	25
Slika 6 Pločasti kondenzator	26
Slika 7 Kapacitivni pretvornik vlage u tehnici tankog filma.....	26
Slika 8 Piezoelektrični pretvornik vlage.....	28
Slika 9 Shematski prikaz izvedbe mjerila vlage u plinovima i mokrine u tekućinama.....	28
Slika 10 Shema umjeravanja generatorom točke rose.....	30
Slika 11 Shema usporednog umjeravanja točkom rose	31
Slika 12 Shema umjeravanja mjerenjem temperature točke rose i ispitne temperature	32
Slika 13 Umjeravanje generiranjem relativne vlažnosti	33
Slika 14 Shema termodinamičkih procesa u saturatoru	36
Slika 15 Shema rada niskotemperaturnog generatora vlažnosti	36
Slika 16 Predsaturator niskotemperaturnog generatora vlažnosti	37
Slika 17 Posuda saturatora niskotemperaturnog generatora vlažnosti.....	38
Slika 18 Shema rada visokotemperaturnog generatora vlažnosti	39
Slika 19 Shema klimatske komore generatora vlažnosti s njenim popratnim dijelovima.....	40
Slika 20 Tlačni sustav za pripremu zraka	51
Slika 21 Princip rada pločastih izmjenjivača	53
Slika 22 Pločasti izmjenjivač GEA serije GNS	54
Slika 23 3D model budućeg sustava s pločastoim izmjenjivačem 1	58
Slika 24 3D model budućeg sustava s pločastim izmjenjivačem 2	59
Slika 25 Nacrt, tlocrt i bokocrt budućeg sustava	59
Slika 26 Ovisnost snage hladila o temperaturnoj razlici.....	63
Slika 27 Shematski prikaz sustava za hlađenje struje vode.....	63

POPIS TABLICA

Tablica 1 Točke umjeravanja	47
Tablica 2 Parametri zraka na ulazu i izlazu iz kondnezatora	52
Tablica 3 Dimenzije pločastog izmjenjivača GEA GNS 100	54
Tablica 4 Parametri centrifugalne pumpe EW-72008-00	60
Tablica 5 Podaci potrebni za izračun toplinskih dobitaka struje vode kroz cijev	61
Tablica 6 Parametri termoelektričnog hladila	62

POPIS OZNAKA

\dot{Q} – ukupna potrebna snaga izmjenjivača, [W]

Q_{cijev} – dovedena toplina struji vode kroz cijevi, [W]

d_e – ekvivalentni promjer izmjenjivača, [m]

$e_w(t_d)$ – parcijalni tlak čiste vodene pare pri izlaznoj temperaturi, [Pa]

$e_w(t_s)$ – parcijalni tlak čiste vodene pare pri temperaturi zasićenja, [Pa]

k_{cijev} – koeficijent toplinske vodljivosti materijala, [W/mK]

p_a – atmosferski tlak, [Pa]

p_d – izlazni tlak plina, [Pa]

p_s – tlak plina u saturatoru, [Pa]

p_w – parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku, [Pa]

q_m – maseni protok zraka, [g/s]

r_o – vanjski polumjer cijevi, [m]

r_u – unutarnji polumjer cijevi, [m]

t_d – izlazna temperatura iz saturatora, [K]

t_s – temperatura u saturatoru, [K]

x_{wd} – molni udio vodene pare na izlazu iz saturatora, [kg/kg]

x_{ws} – molni udio vodene pare u saturatoru, [kg/kg]

α_w – koeficijent prijelaza topline na strani vode, [W/m²K].

α_{zr} – koeficijent prijelaza topline na strani zraka, [W/m²K]

ϑ_o – temperatura okoline, [K]

ϑ_u – temperatura struje vode u cijevi, [K]

ϑ_{w1} – temperatura vode na ulazu u izmjenjivač, [K]

ϑ_{w2} – temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača, [K].

ϑ_{zr1} – temperatura vlažnog zraka na ulazu u izmjenjivač, [K]

ϑ_{zr2} – temperatura suhog zraka na izlazu iz izmjenjivača, [K]

$\Delta\vartheta_m$ – logaritamska razlika temperatura, [K]

Δh - razlika entalpija ulaznog i izlaznog stanja zraka, [J/g]

A – površina izmjene toplina, [m²]

C – konstanta, kod pločastih izmjenjivača, $C = 0,15 \div 0,40$, [-]

L – duljina cijevi, [m]

Nu – Nusselt-ov broj, [-]

Pr - Prandtl-ov broj, [-]

Re – Reynolds-ov broj, [-]

b – razmak između dvije susjedne ploče izmjenjivača, [m]

$f(p_d, t_d)$ – faktor povećanja procijenjen pri izlaznoj temperaturi i tlaku, [-]

$f(p_s, t_s)$ – faktor povećanja procijenjen pri temperaturi i tlaku zasićenja, [-]

k – koeficijent prolaza topline, [W/m²K]

w – brzina strujanja fluida kroz izmjenjivač, [m/s]

Λ – faktor povećanja, $\Lambda = 1,10 \div 1,25$, [-]

δ – debljina ploče kondenzatora, [m]

$\delta=0,62197$ - omjer specifičnih plinskih konstanti, vodene pare naspram suhog zraka, [-]

η – dinamička viskoznost, [Pa s]

λ – koeficijent toplinske vodljivosti materijala kondenzatora, [W/mK]

λ – koeficijent toplinske vodljivosti, [W/mK]

ρ – gustoća fluida, [kg/m³]

SAŽETAK

Za potrebe ovog rada izrađen je pregled teorijskih podloga za ispitivanje i umjeravanje higrometara točke rose, koji se umjeravaju na generatorima vlažnosti (niskotemperaturnim i visokotemperaturnim). Također je opisan postojeći visokotemperaturni generator vlažnosti te njegov princip rada. U radu su sagledani zahtjevi na tlačni sustav za pripremu, sušenje i mjerenje protoka plina u generatoru vlažnosti te je sustav i shematski prikazan. Trebalo je pronaći rješenje za sušenje vlažnog zraka na izlazu iz generatora vlažnosti. Zbog te potrebe za kondenziranjem vlage iz zraka, predložen je pločasti izmjenjivač. Proračunom tog izmjenjivača postavljeni su temelji za njegov odabir i implementacije u sustav. Budući da je potrebna temperatura vode u izmjenjivaču niža od temperature okoline u prostoriji, potrebno je njeno hlađenje. S tim ciljem, proveden je proračun te je donesen prijedlog sustava za hlađenje struje vode termoelektričnim hladilom, uzevši u obzir prednosti korištenja termoelektričnih hladila u usporedbi s konvencionalnim hladnjacima poput rjeđe potrebe za održavanjem, manje dimenzije, precizne kontrole temperature (unutar jednog stupnja) u nepovoljnijim uvjetima, te regulacija promjenom napona/jakosti struje.

1. UVOD

Meteorološki sustav u Hrvatskoj koncipiran je tako da Hrvatski mjeriteljski institut (HMI) dijeli arhitekturu: usklađujući, podržavajući i međunarodno predstavljajući sve nacionalne standarde, dok je HMI trenutno jedini direktni standard za masu i gustoću. Nacionalni standardi za temperaturu, tlak i vlažnost, smješteni su u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM) u sklopu Fakulteta strojarstva i brodogradnje-Sveučilišta u Zagrebu. Rasponi umjeravanja i mjerne nesigurnosti ovih standarda su prilagođeni dostupnim resursima i potrebama umjeravanja u Republici Hrvatskoj.

Kako bi odgovorili na sve veću potražnju za umjeravanjem vlagomjera (higrometara) u Hrvatskoj, koju je djelomično pobudilo jako rasprostranjeno certificiranje sustava kontrole kvalitete, nekoliko ustanova za umjeravanje higrometara je razvijeno tijekom zadnjih 15 godina u LPM-u.

Prva takva ustanova dovršena je 1997. godine. Osnova joj je bio dvotemperaturni recirkulirajući generator vlažnosti namijenjen radu u području od 5°C do 65°C temperature točke rose. Posebnost ovog sustava je bila jako velika komora za testiranje konstruirana za akomodaciju higrometara točke rose, senzore relativne vlažnosti kao i uređaja za snimanje rezultata bez daljinskih senzora.

Također 1997. godine je završen i drugi generator vlažnosti, jednotlačnog i dvotemperaturnog principa. Imao je šire radno područje (-15°C do 60°C) temperature točke rose, šire radno područje (-15°C do 90°C) ispitne komore, bolju stabilnost i bolji odziv na stepenaste promjene temperature i nižu ukupnu nesigurnost. Testna komora koja je bila potopljena kapljevitu kupku, mogla je sadržavati samo sonde za relativnu vlažnost kojima se daljinski upravljalo. Generator je prvotno namijenjen radu u recirkulirajućem režimu pri atmosferskom tlaku s mogućnošću uporabe u režimu otvorenog kruga ugrađenog u konstrukciju.

Upravo ovaj generator je LPM koristio u projektu EURAMET no. 621, povezujući LPM-ovu realizaciju skale točke rose sa referentnim vrijednostima T-K6 sa mjernim nesigurnostima od oko 100 mK pri temperaturi točke rose -10°C i oko 50 mK pri temperaturi točke rose od 20°C ($k=1$).

Kako bi se proširio raspon točke rose i smanjile mjerne nesigurnosti realizacije skale vlažnosti LPM-a, dva nova primarna generatora točke rose su razvijena u suradnji s MIKES, počevši 2006. godine kroz EURAMET-ov projekt no.912. Generatori su konstruirani za realizaciju skale točke rose u rasponu od -70°C do +60°C.

MIKES je konstruirao i projektirao oba generatora za implementaciju u LPM-ov sustav umjeravanja točke rose. LPM je kupio i prilagodio kapljevite kupke, ugradio odgovarajuću opremu za mjerenje

temperature i tlaka, pobrinuo se za pripremu plina i sustav kontrole protoka kao i za automatsko prikupljanje podataka računalnim sustavom.

Uslijed poteškoća pri pronalasku izvođača u fazi konstrukcije saturatora došlo je do kašnjenja u izvedbi projekta-niskotemperaturni saturator je dostavljen u svibnju, a visokotemperaturni u kolovozu 2008. godine. Saturatori su prvotno testirani u MIKES-u prije dostavljanja u LPM.

2. TRENUTAČNA ORGANIZACIJA HRVATSKOG NACIONALNOG MJERITELJSKOG SUSTAVA

2.1. Državni zavod za mjeriteljstvo

Državni zavod za mjeriteljstvo državna je upravna organizacija koja je zadužena za obavljanje mjeriteljskih djelatnosti u skladu s odredbama Zakona o mjeriteljstvu. Najvažnije aktivnosti su sljedeće:

- donošenje mjeriteljskih propisa
- provedba mjeriteljskog nadzora
- obavljanje mjeriteljskih aktivnosti i predstavljanje Republike Hrvatske u međunarodnim mjeriteljskim organizacijama.

DZM je organiziran u službe i odjele i zapošljava 115 državnih službenika. DZM je odgovoran za proglašavanje državnih etalona i ovlašćivanje nacionalnih laboratorija nositelja etalona te pravnih osoba koje djeluju u području primjene zakonskog mjeriteljstva, a ujedno i usklađuje i nadzire njihove aktivnosti.

DZM je član OIML-a, EUROMET-a i DUNAMET-a, a pridruženi je član CGPM-a i WELMEC-a, te potpisnik CIPM MRA.

LABORATORIJI NOSITELJI NACIONALNIH ETALONA

Laboratoriji nositelji nacionalnih etalona bitna su sastavnica nacionalnog mjeriteljskog sustava, kao laboratoriji koji ostvaruju, čuvaju i održavaju državne etalone te osiguravaju mjernu sljedivost na najvišoj razini u zemlji. Trenutačno u sustavu djeluje šest nacionalnih laboratorija nositelja etalona (dva unutar DZM-a i četiri ovlaštena na Sveučilištu u Zagrebu). Svi nacionalni laboratoriji imaju međunarodnu akreditaciju (njemačkog DKD-a ili talijanskog SIT-a) za odgovarajuća područja i opseg svoga djelovanja.

HRVATSKA AKREDITACIJSKA AGENCIJA (HAA)

Hrvatska akreditacijska agencija (HAA) javna je ustanova osnovana na temelju Zakona o akreditaciji (Narodne novine br. 158/2003), a započela je sa samostalnim radom 1. srpnja 2005. godine. Punopravna je članica EA i pridružena članica ILAC-a. HAA ima ukupno 100 akreditiranih tijela u 7 akreditacijskih shema: ispitni laboratoriji, umjerni laboratoriji, inspekcijska tijela, certifikacijska tijela za proizvode, osobe i sustave upravljanja kvalitetom i okolišem. Trenutno razvija akreditacijsku shemu za medicinske laboratorije. HAA i mreža akreditiranih tijela za ocjenu sukladnosti predstavljaju osnovu za provedbu tehničkog zakonodavstva, ocjenu sukladnosti proizvoda, procjenu stanja zaštite

okoliša, zaštite zdravlja i zaštite potrošača te osiguravaju provedbu nadzora nad tržištem u Republici Hrvatskoj.

Dosad je za područje umjeravanja prema normi HRN EN ISO/IEC 17025 akreditirano osam laboratorija. Njihovu akreditaciju provela je Hrvatska akreditacijska agencija. U Hrvatskoj postoji veći broj organizacija koje posjeduju referentne etalone te koje pružaju usluge umjeravanja i ispitivanja u različitim područjima: Institut Ruđer Bošković sa svojim kemijskim laboratorijima, sustav Instituta za javno zdravstvo i laboratoriji ustanovljeni pri nekim većim poduzećima (u farmaceutskoj, elektrotehničkoj, prehrambenoj te naftnoj industriji...).

Hrvatska akreditacijska agencija zahtjeva prema HAA-Pr-2/6 Pravilu za međulaboratorijska i druga poredbena ispitivanja, 2. veljače 2009.: „Svi akreditirani laboratoriji i oni koji to žele postati moraju sudjelovati u PT/EQA/ILC programima kada su takvi programi dostupni i važni za područje akreditacije laboratorija. Laboratoriji su dužni istražiti dostupnost PT/EQA/ILC programa i utvrditi njihovu prikladnost.“

Hrvatska akreditacijska agencija traži:

- Laboratorij mora sam provjeriti je li PT shema u skladu s ISO Guide 43-1 ili ILAC G13
- Hrvatska akreditacijska agencija obavještava laboratorije o mogućnosti sudjelovanja
- Koristiti bazu EPTIS
- Politika i učestalost sudjelovanja su predmet ocjene
- Laboratorij mora imati dokumentirani postupak za analizu rezultata međulaboratorijskog uspoređivanja i provedbu popravnih i/ili preventivnih radnji
- Prije dodjele Potvrde o akreditaciji moraju priložiti dokaz o sudjelovanju u međulaboratorijskom uspoređivanju
- Laboratorij mora u pisanom obliku obavještavati Hrvatsku akreditacijsku agenciju o svom sudjelovanju u međulaboratorijskom uspoređivanju
- Preporučeni minimum sudjelovanja akreditiranih laboratorija, u skladu s dokumentima EA-a i ILAC-a, jest jednom za svaku pojedinu disciplinu obuhvaćenu područjem akreditacije, unutar razdoblja važenja Potvrde o akreditaciji (5 godina).

HRVATSKI ZAVOD ZA NORME (HZN)

Hrvatski zavod za norme (HZN) nacionalno je normirno tijelo Republike Hrvatske. Osnovana ga je Vlada Republike Hrvatske Uredbom o osnivanju Hrvatskog zavoda za norme (Narodne novine 154/2004, 44/2005) donesenom na temelju Zakona o normizaciji (Narodne novine 163/2003). Hrvatski zavod za norme (HZN) započeo je s radom 1. srpnja 2005. godine. On predstavlja Republiku

Hrvatsku u međunarodnim organizacijama za normizaciju ISO (International Organization for Standardization) i IEC (International Electrotechnical Commission) kao punopravni član; u Europskom institutu za telekomunikacijske norme ETSI (European Telecommunications Standards Institute) u statusu nacionalnog normirnog tijela; a u europskim organizacijama za normizaciju CEN (European Committee for Standardization) i CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) kao pridruženi član.

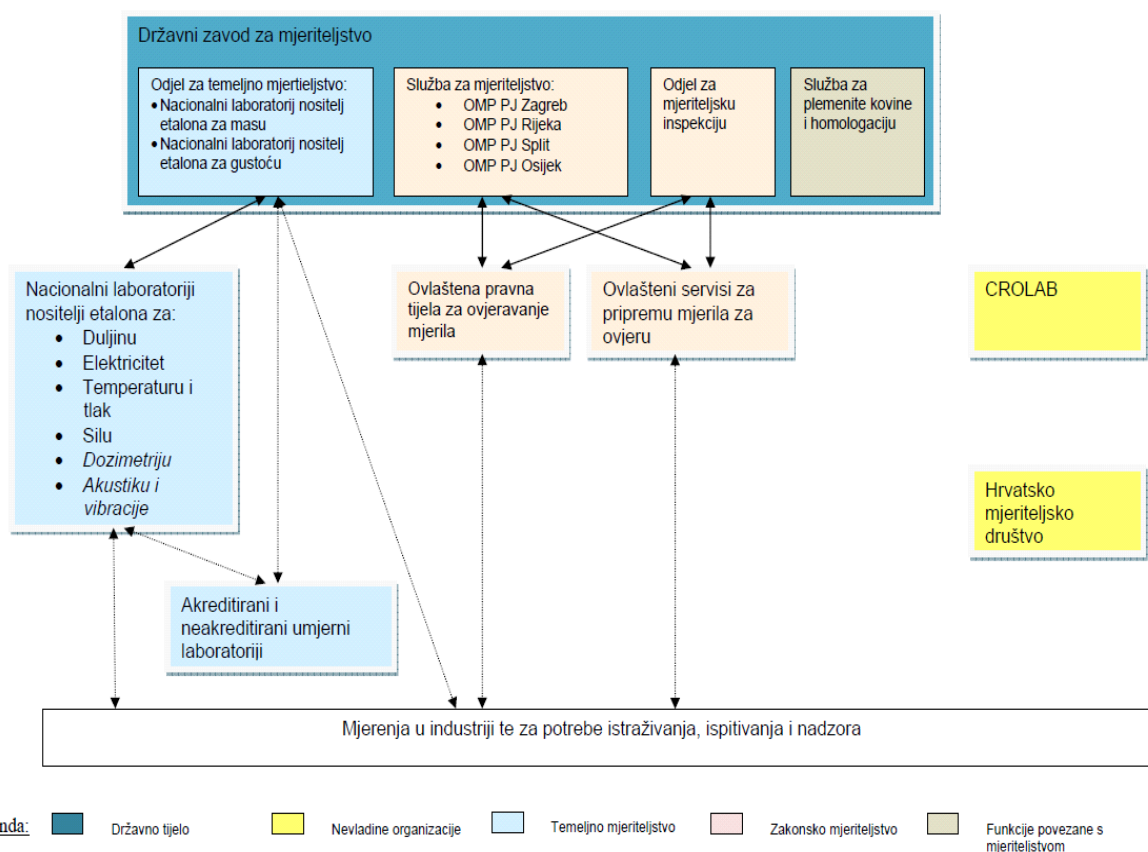
HRVATSKI LABORATORIJ, CROLAB

Udruga nacionalnih mjeriteljskih, ispitnih i analitičkih laboratorija, koja se naziva Hrvatski laboratoriji CROLAB (www.crolab.hr), osnovana je 2003. godine kao pravna osoba i neprofitna (i nevladina) nacionalna organizacija. Cilj je CROLAB-a udruživanje laboratorija radi unapređivanja sustava kakvoće svakoga pojedinog laboratorija i radi olakšavanja njihova uključivanja na europsko tržište uporabom zajedničkih sredstava i potencijala. Više od 100 laboratorija članovi su CROLAB-a. Ta je organizacija član EUROLAB-a i EUROCHEM-a.

HRVATSKO MJERITELJSKO DRUŠTVO

Hrvatsko mjeriteljsko društvo (www.hmd.hr, član EUROLAB-a) i KoREMA dragovoljne su neprofitne i nevladine udruge koje promiču mjeriteljstvo na nacionalnoj i međunarodnoj razini. KoREMA je član Međunarodne mjeriteljske konfederacije (IMEKO) u čijim tehničkim odborima i aktivnostima sudjeluju i hrvatski predstavnici. [2]

TRENUTAČNA ORGANIZACIJA HRVATSKOGA NACIONALNOG MJERITELJSKOG SUSTAVA



Slika 1 Prikaz organizacije hrvatskog nacionalnog mjeriteljskog sustava

3. VLAŽNOST

3.1. Uvod

Pojam 'vlažnosti' odnosi se na vodenu paru odnosno plin, vodu u plinovitom stanju. Vlažnost je prisutna u cijeloj Zemljinoj atmosferi, čak i u iznimno suhim područjima. Mjerenje vlažnosti je puno zahtjevnije od mjerenja drugih svojstava poput protoka, temperature, razine i tlaka. Jedan od razloga je vrlo velik dinamički raspon, koji može biti od 1 ppb-a ili manje (ledište na -112°C) i imati parcijalni tlak pare od $0,8 \times 10^{-6}$ mm Hg, do zasićene pare na 100°C koja ima parcijalni tlak pare od 760 mm Hg. Ovo čini dinamički raspon od otprilike 10^9 . Također, još jedan od problema je što se mjerenja provode u različitim uvjetima, npr. pri temperaturama od -80 do 1000°C , u prisutnosti različitih plinova koji mogu biti korozivni ili ne korozivni, te u prisutnosti različitih onečišćivala.

Mjerenje vlažnosti ima sve veću ulogu u industrijskim i laboratorijskim primjenama te u kontroli procesa omogućavajući poboljšanja u kvaliteti proizvoda, smanjenje troškova ili povećanje ugodnosti ljudi.

Ova mjerenja su toliko bitna da se stariji i jednostavniji uređaji za mjerenje vlažnosti ili detektori točke rose više ne smatraju dovoljno točnima i prikladnima za većinu industrijskih procesa. To je dovelo do korištenja sofisticiranijih instrumenata koji će zadovoljiti stroge zahtjeve koje nameću zakoni.

U zadnje vrijeme povećala se važnost mjerenja vlažnosti pogotovo u industriji, jer se prepoznalo da vlažnost ima značajan utjecaj na kvalitetu života, na kvalitetu proizvoda, sigurnost, cijenu i zdravlje. Ovo je dovelo do značajnog razvoja mjerenja vlažnosti i u skladu s tim do povećanja istraživanja i razvoja aktivnosti koje će poboljšati tehnike mjerenja, točnost i pouzdanost instrumenata.

Unatoč razvoju i istraživanju tijekom zadnja dva desetljeća kako bi se poboljšali osjetnici vlažnosti, trenutno je stanje takvo da mjerenje vlažnosti i dalje zahtjeva više brige, više održavanja i više umjeravanja od drugih analitički mjerenja. Nadalje, još uvijek ne postoji osjetnik koji bi bio blizu pokrivanja cijelog dinamičkog raspona razine vodene pare. Stoga se kroz godine razvijalo mnogo različitih metoda mjerenja i osjetnika, koji su imali svoje prednosti i ograničenja i bili pogodni za neke, ali ne sve primjene. [1]

3.2. Apsolutna vlažnost

Apsolutna vlažnost zraka je maksimalna količina vodene pare koju može primiti 1 m^3 zraka (u gramima). Najčešća jedinica za apsolutnu vlažnost je gram po metru kubnom (g/m^3), no može se koristiti bilo koja jedinica za masu i zapreminu. Ako bi se sva voda u jednom metru kubnom zraka

izkondenzirala u spremniku, spremnik bi se mogao izvagati i time utvrditi vrijednost apsolutne vlažnosti. Naime, količina pare u tom kubiku zraka je apsolutna vlažnost tog metra kubnog zraka, odnosno masa vodene pare m_w , po metru kubnom zraka V_a :

$$AV = \frac{m_w}{V_a}$$

Apsolutna vlažnost kreće se u intervalu od 0 g/m³ u suhom zraku do 30 g/m³ kada je para zasićena na 30 °C. Apsolutna vlažnost mijenja se u ovisnosti o tlaku zraka, što je veoma nezgodno za proračune u kemijskom inženjerstvu. Stoga se apsolutna vlažnost u kemijskom inženjerstvu općenito definira kao masa vodene pare po jedinici mase suhog zraka, poznato i kao omjer mješavine masa.

3.3. Omjer mješavine ili omjer vlažnosti

Omjer mješavine ili omjer vlažnosti je izražen kao omjer kilograma vodene pare m_w , po kilogramu suhog zraka m_d , pri datom tlaku. Često se koristi termin sadržaj vlage umjesto termina omjer mješavine/vlažnosti. Omjer vlažnosti je standardna os na psihrometrijskim tabelama, te je koristan parametar u psihrometrijskim proračunima jer se ne mijenja s temperaturom, osim kad se zrak ohladi ispod temperature točke rose. Omjer mješavine/vlažnosti dat je kao:

$$OM_i = \frac{m_w}{m_d}$$

Ovaj omjer se također može izraziti i preko parcijalnog tlaka vodene pare:

$$OM_i = \delta \frac{p_w}{p_a - p_w}$$

Gdje je:

$\delta=0,62197$ - omjer specifičnih plinskih konstanti, vodene pare naspram suhog zraka

p_w – parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku

p_a – atmosferski tlak

3.4. Relativna vlažnost

Relativna vlažnost je definirana kao omjer parcijalnog tlaka vodene pare u plinovitoj mješavini zraka i vodene pare p_p , naspram tlaka zasićenja pri zadanoj temperaturi $p_{sp}(T)$. Relativna vlažnost se izražava u postotcima, a računa se na slijedeći način:

$$RV = \frac{p_p}{p_{sp}(T)} = \frac{m_p}{m_{sp}(T)}$$

3.5. Specifična vlažnost

Specifična vlažnost je omjer vodene pare i zraka (uključujući vodenu paru i suhi zrak) u određenoj masi. Omjer specifične vlažnosti izražen je kao omjer mase vodene pare m_w , po masi vlažnog zraka (uključujući vodenu paru) m_{dt} . Specifična vlažnost iskazuje se na slijedeći način:

$$SV = \frac{m_w}{m_{dt}}$$

Specifična vlažnost povezana je sa omjerom mješavine (i obrnuto) preko slijedećih izraza:

$$SV = \frac{OM}{1 + OM}$$

$$OM = \frac{SV}{1 - SV}$$

3.6. Vlažnost i gustoća zraka

Vlažan zrak je manje gustoće od suhog zraka zato što je molekula vode ($m=18$) manje gustoće od molekule dušika ($m=28$) koji čini oko 78% suhog zraka, i molekule kisika ($m=32$) koji čini 21% suhog zraka. Preostalih 1% molekula suhog zraka je mješavina ostalih plinova; argona, ugljikovog dioksida, vodika, metana,... Za bilo koji plin, pri datoj temperaturi i tlaku, broj sadržanih molekula je konstantan za određenu zapreminu (zakon idealnog plina), stoga kada se molekule vode (pare) pomiješaju sa suhim zrakom, broj molekula zraka mora se smanjiti za isti broj u datoj zapremini bez povećanja tlaka ili temperature. Zbog ovoga se smanjuje masa po jedinici zapremine plina te posljedično i gustoća.

3.7. Mjerenje i reguliranje vlažnosti

Postoje različiti uređaji za mjerenje i reguliranje vlažnosti. Uređaj kojim se mjeri vlažnost naziva se psihrometar ili higrometar. Budući da se vodena para pojavljuje u smjesama plinova, ponaša se u skladu sa zakonima koji vrijede za plinove i napregnuta je parcijalnim tlakom u smjesi prema Daltonovom zakonu. Daltonov zakon je vjerojatno najvažniji zakon za plinove primjenjiv na mjerenja vlažnosti. Prema ovom zakonu, mjerenje vlažnosti se u principu svodi na mjerenje parcijalnog tlaka vodene pare u smjesi plinova. Jedan od najčešćih i najosnovnijih načina mjerenja parcijalnog tlaka, je mjerenjem temperature kondenzacije traženog plina u smjesi. Stoga je najosnovniji način mjerenja parcijalnog tlaka vodene pare, hlađenjem smjese plina dok se voda ne izkondenzira i određivanjem točne temperature pri kojoj se to dogodilo. Ova temperatura je poznata kao temperatura točke rose. Postoji direktna veza između temperature točke rose i parcijalnog tlaka vodene pare, koji se također naziva tlak pare. [5]

4. MJERENJE RELATIVNE VLAŽNOSTI

4.1. Uvod

Mjerenje vlažnosti kao što je već prethodno napomenuto ima veliku ulogu u različitim procesima u industriji. Statistička kontrola kvalitete i trend takozvanih nultih pogrešaka u proizvodnji prisiljavaju izvođenje višestrukih mjerenja u tijeku procesa proizvodnje čime se stvaraju pretpostavke za proizvodnju visokokvalitetnih i konkurentnih proizvoda. Ta mjerenja su neophodna u mnogim industrijama. Primjeri su česti u tekstilnoj industriji (u previše suhoj atmosferi, tkanine u pokretu se nabiju statičkim elektricitetom), u višebojnom tisku (tiskanje u sljedećoj boji vrši se nakon sušenja prethodne boje, a zbog promjene vlage zraka papir mijenja dimenzije i može doći do nepravilnog slaganja boja), pri praćenju promjene mokrine drveta u sušarama, pri mjerenju mokrine u žitaricama, u meteorologiji,... Postoje različiti načini i izvedbe mjerila vlažnosti, neki od njih su:

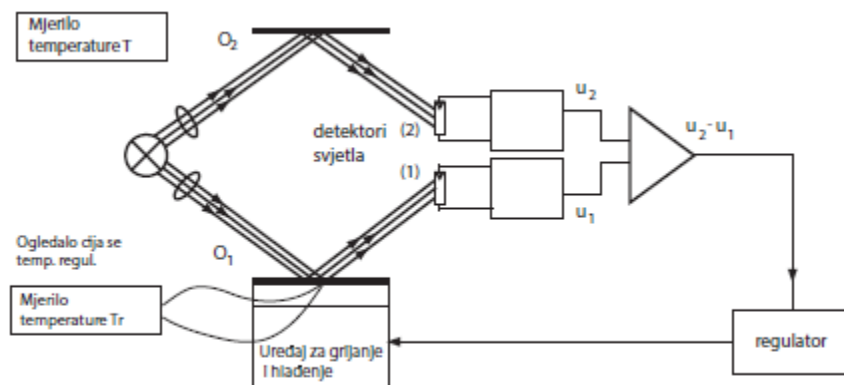
- Mjerenje relativne vlažnosti pomoću temperature točke rose
- Psihrometri
- Higrometri s vlaknima (životinjskog podrijetla ili sintetički)
- Otpornički higrometri
- Kapacitivni higrometri
- Elektrolitički higrometri
- Higrometri sa samozagrijavanjem
- Piezoelektrički higrometri
- Infracrveni higrometri
- Mikrovalni higrometri
- Nuklearni higrometri

4.2. Mjerenje relativne vlažnosti pomoću temperature točke rose

Pri relativnoj vlažnosti manjoj od 100% tlaku vodene pare p_p na temperaturi T odgovara temperatura $t_r < T$ pri kojoj tlak p_p predstavlja tlak zasićene vodene pare $p_{zp}(T_r)$. Temperatura T_r naziva se temperatura točke rose. Određivanjem temperature točke rose, možemo izračunati relativnu vlažnost zraka prema slijedećem izrazu:

$$RV = \frac{p_{zp}(T_r)}{p_{zp}(T)}$$

Pri čemu podatke o $p_{zp}(T_r)$ i $p_{zp}(T)$ očitamo iz tablice ovisnosti tlaka zasićene vodene pare o temperaturi. [8] Shema izvedbe prikazana je na slici 2.



Slika 2 Mjerenje relativne vlažnosti pomoću temperature točke rose

Temperatura ogledala O_1 mjeri se pomoću mjerila temperature smještenog neposredno ispod reflektirajuće površine, a regulira se pomoću uređaja za hlađenje (Peltier) i grijanje. Kada je temperatura ogledala O_1 veća od temperature točke rose T_r na njegovoj površini se formiraju kapljice vode koje smanjuju intenzitet svjetlosti na detektoru 1, a time i pad napona u_1 u odnosu na napon u_2 što rezultira uključivanjem grijanja ogledala O_1 . Temperatura ogledala O_1 poraste iznad T_r , sloj vlage ishlapi pa je ponovo $u_1 = u_2$ i ponovno se uključuje hlađenje. Prema tome, temperatura ogledala će O_1 će oscilirati oko temperature točke rose T_r koja se očitava s mjerila temperature. Uz poznate temperaturu okoline T i temperaturu točke rose T_r iz tablice ovisnosti tlaka zasićene vodene pare o temperaturi očitamo pripadajuće vrijednosti tlaka $p_{zp}(T_r)$ i $p_{zp}(T)$ te izračunamo relativnu vlažnost.

Prednost ove metode je njezina točnost, naime točnost određivanja T_r iznosi do $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nedostatci su joj osjetljivost na čistoću ogledala, velika potrošnja energije te visoka cijena.

4.3. Psihrometar

Rad psihrometra (engl. Psychrometer, dry/wet bulb) temelji se na činjenici da vlažni predmeti zbog isparavanja imaju nižu temperaturu od suhih. Sastoji se od dva temperaturna osjetnika od kojih je jedan suh i pokazuje stvarnu temperaturu zraka T dok je drugi osjetnik omotan vlažnom gazom i pokazuje temperaturu $T_v < T$. Iz tablice se očitavaju odgovarajući tlakovi zasićene pare $p_{zp}(T_v)$ i $p_{zp}(T)$ te se izračuna relativna vlažnost prema izrazu:

$$RV = \frac{p_{zp}(T_v) - A(T - T_v)p_a}{p_{zp}(T)}$$

Pri čemu je p_a atmosferski tlak, a A veličina koja prvenstveno ovisi o brzini strujanja zraka. Pri brzinama zraka od 3 do 5 m/s, A ima približno konstantnu vrijednost od $(6,35 \pm 0,15)10^{-14}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Prilikom

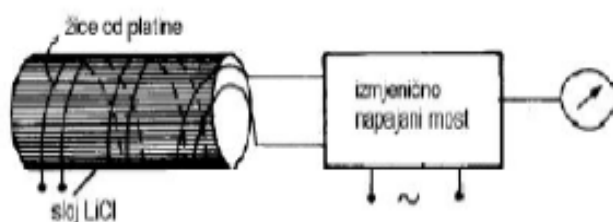
ugradnje psihrometra treba osigurati strujanje zraka u navedenom opsegu brzina. Ovom metodom se ubacuje dodatna vodena para u zrak. Što može biti nepoželjno u nekim situacijama.

4.4. Higrometri s vlaknima

Mjerenje vlage s vlaknima (engl. Hair hygrometers) je konstrukcijski prilično jednostavna metoda. Naime, neki materijali poput ljudskih i životinjskih dlaka te mnoga sintetička vlakna mijenjaju duljinu u ovisnosti o relativnoj vlažnosti zraka. na tom načelu radi veći broj jednostavnih mjerila vlažnosti zraka. kao osjetnik koristi se pramen od desetak vlakana koji je prednapet pomoću opruge. Promjena duljine uslijed promjene relativne vlažnosti pokreće mehanizam s kazaljkom koja na skali pokazuje relativnu vlažnost. Nakon umjeravanja na temperaturi od 15 do 20 °C točnost higrometra iznosi 3 do 4% u temperaturnom rasponu od 8 do 35 °C. Mogu se koristiti za mjerenje u opsegu temperatura od 10 do 60 °C uz prethodno umjeravanje na radnoj temperaturi. Moraju se često umjeravati.

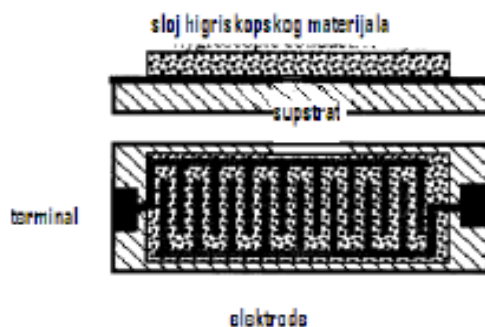
4.5. Optički pretvornici vlage

Higroskopni materijali (npr. litijev klorid, polistiren, aluminijev oksid) imaju sposobnost upijanja vlage iz zraka, pri čemu im se bitno mijenja električni otpor. Na valjakasto tijelo od izolatora namotane su dvije žice od platine koje se međusobno ne dodiruju, kao što je prikazano na slici 3.



Slika 3 Optički pretvornik u valjkastoj izvedbi

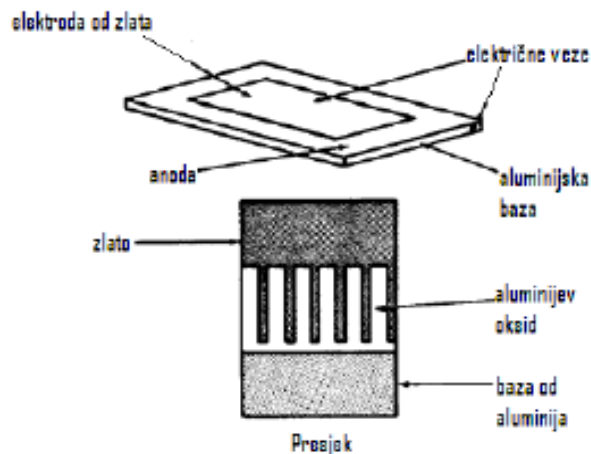
Po cijeloj površini nanesen je sloj litijevog klorida. Povećanjem vlažnosti smanjuje se otpor. Isti pretvornik u pločastoj izvedbi prikazan je na slici 4; na supstrat su naneseni vodiči preko kojih je postavljen sloj higroskopnog materijala. Pretvornik vlage u kojemu se kao higroskopni materijal koristi litijev klorid naziva se 'Dunmore cell'.



Slika 4 Optički pretvornik u pločastoj izvedbi

Ako se kao higroskopsni materijal upotrijebi polistiren tretiran sumpornom kiselinom tada se pretvornik naziva 'Pope cell'.

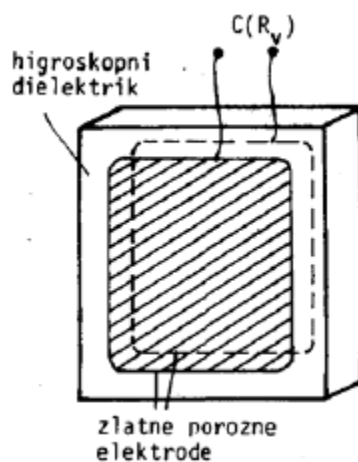
Nadalje senzor mjerenja impedancije prikazan na slici 5 ima na aluminijskoj pločici (prvi kontakt) formiran porozni sloj aluminijevog oksida. Preko njega je nanesen tanki porozni sloj zlata (drugi kontakt). Vodena para prolazi kroz tanki sloj zlata i apsorbira se Al_2O_3 sloju. Impedancija ovakvog pretvornika ovisi o količini vlage u Al_2O_3 sloju. Mjerenje se provodi izmjeničnom strujom radi izbjegavanja elektrolize apsorbirane vode. Sklop radi na frekvenciji na kojoj ne dolazi do izražaja kapacitivna komponenta impedancije.



Slika 5 Senzor mjerenja impedancije

4.6. Kapacitivni pretvornici vlage

Kao dielektrik koristi se higroskopsni materijal kojem se uslijed apsorbirane vlage bitno mijenjaju dielektrička svojstva-najčešće su to higroskopsni polimeri, debljine 8 do 12 μm dimenzija 12x12 mm na čije je stranice naparen tanki sloj zlata čime se formira pločasti kondenzator kao što je prikazano na slici 6.



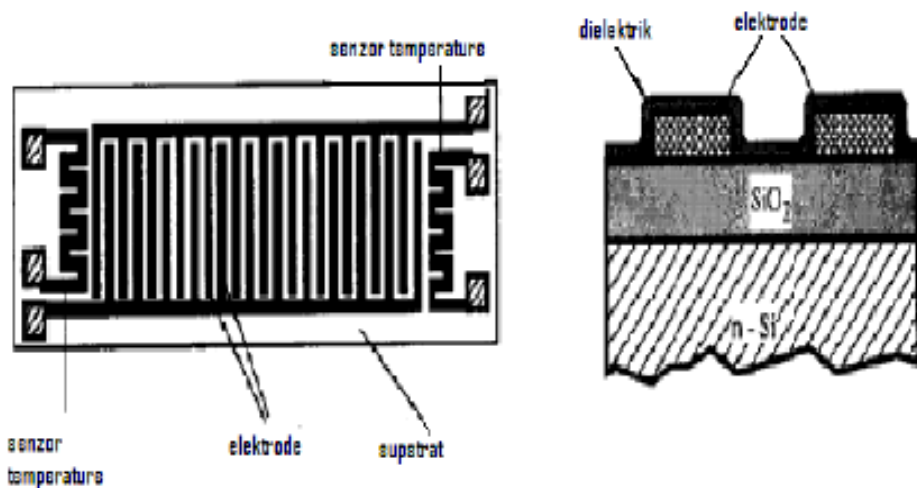
Slika 6 Pločasti kondenzator

Promjena kapaciteta u ovisnosti o relativnoj vlažnosti zraka može se približno opisati izrazom:

$$C_{RV} = C_0(1 + \alpha_{RV}RV)$$

Pri čemu je C_0 kapacitet pri $RV=0\%$, a α_{RV} je konstanta.

Izvedba kapacitivnog pretvornika vlage u tehnici tankog filma, prikazana je na slici 7. Na istom susstratu su izvedeni i temperaturni senzori.



Slika 7 Kapacitivni pretvornik vlage u tehnici tankog filma

Karakteristike ovih higrometara su raspon mjerenja relativne vlažnosti do 5 do 90%u temperaturnom području od 0 do 50 °C, s točnošću od 2%.

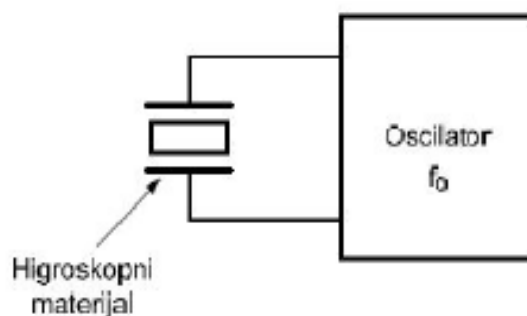
4.7. Pretvornici vlage sa samozagrijavanjem i elektrolitski pretvornici

Ovakvi uređaji temelje se na otporničkim pretvornicima s litijevim kloridom. Pretvornik se napaja s višim naponom uslijed čega dolazi do zagrijavanja sloja litijevog klorida na temperaturu višu od temperature okoline. Uslijed zagrijavanja isparava se vlaga iz litijevog klorida, povećava se otpor i smanjuje struja kroz pretvornik. Temperatura pretvornika dostiže konstantnu vrijednost pri kojoj se uspostavlja ravnoteža između brzine isparavanja i upijanja vlage iz okoline. Temperatura ravnotežnog stanja je viša pri većoj relativnoj vlažnosti zraka pa se vlažnost očitava pomoću temperaturnog senzora koji mjeri temperaturu zagrijanog sloja litijevog klorida. Ne mogu se koristiti za određivanje vode u tekućinama.

Elektrolitski pretvornici vlage kao higroskopni materijal koriste fosforni pentoksid P_2O_5 , kroz koji se propušta istosmjerna struja. Apsorbirana vlaga se elektrolizom rastavlja na kisik i vodik čime se povećava otpor pretvornika. Struja se smanjuje do trenutka izjednačenja brzine elektrolize i brzine apsorpcije vlage iz zraka. Pri većoj relativnoj vlažnosti zraka i struja pri kojoj se uspostavlja ravnotežno stanje je jača pa se stoga vlažnost zraka očitava pomoću ampermetra. Elektrolitski pretvornici su posebno pogodni za mjerenje malih količina vlage (od 1 ppm). Točnost im je oko 10% pri mjerenju relativne vlažnosti od 1 ppm, kod većih iznos relativnih vlažnosti točnost im poraste za 5%. Vrijeme odziva im je oko 1 minute.

4.8. Piezoelektrični pretvornici vlage

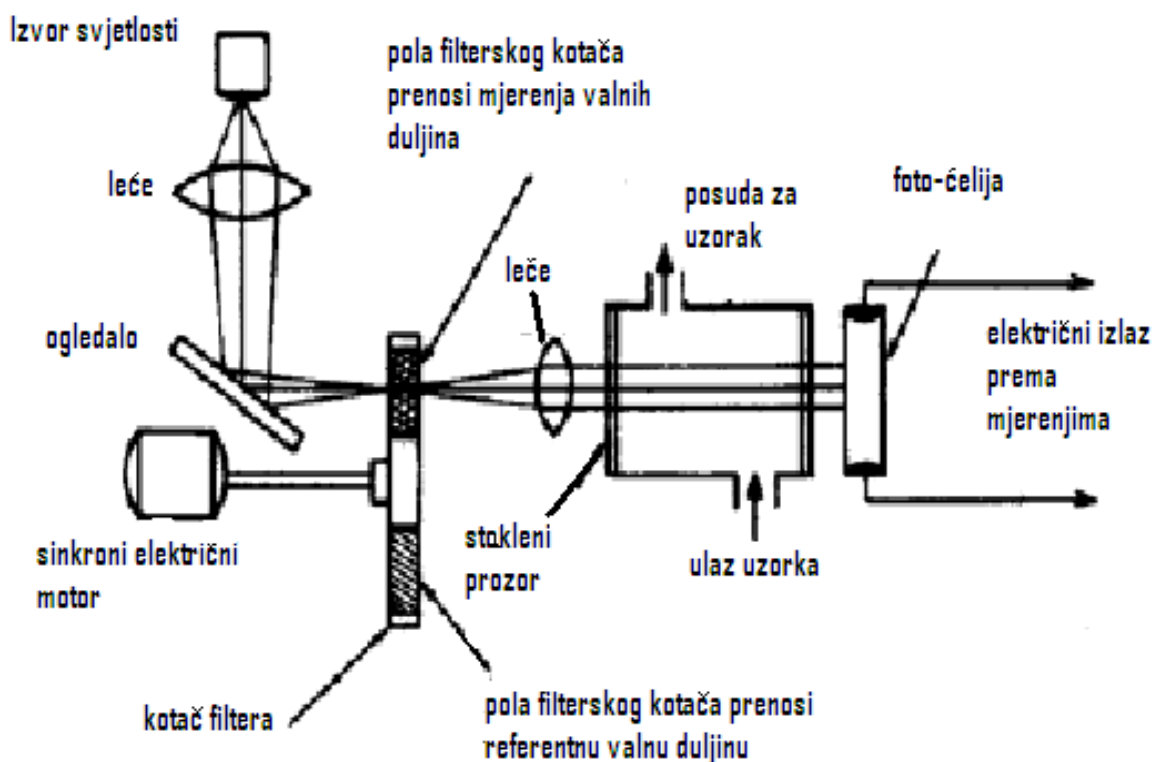
Sastoje se od piezoelektričnog kristala obloženog slojem higroskopnog materijala, kao što je prikazano na slici 8. Pretvornik je spojen u krug oscilatora koji oscilira na rezonantnoj frekvenciji kristala. Pri povećanju vlažnosti se uslijed apsorpcije povećava masa pretvornika što uzrokuje smanjenje njegove rezonantne frekvencije. Relativna vlažnost se određuje mjerenjem promjene frekvencije. Mjerenje se provodi naizmjeničnim puštanjem suhog i vlažnog plina preko pretvornika i određivanjem razlike frekvencija. Upotreba im je ograničena samo na određivanje vlage u plinovima (ne mogu se koristiti za određivanje vlage u tekućinama). Također nisu upotrebljivi za mjerenje vlage u plinovima koji bi mogli tijekom mjerenja stvoriti talog na pretvorniku. Vrijeme odziva je oko 1 minute.



Slika 8 Piezoelektrični pretvornik vlage

4.9. Određivanje vlage i mokrine mjerenjem apsorpcije infracrvenog zračenja

Koristi se za mjerenje vlage u plinovima i mokrine u tekućinama i krutim tvarima. Temelji se na činjenici da voda intenzivno apsorbira infracrveno (IC) zračenje valnih duljina od $1,43 \mu\text{m}$ i $1,93 \mu\text{m}$. Shematski prikaz izvedbe mjerila vlage u plinovima i mokrine u tekućinama prikazan je slici 9.



Slika 9 Shematski prikaz izvedbe mjerila vlage u plinovima i mokrine u tekućinama

Infracrveno svjetlo prolazi kroz optički filter koji naizmjenice propušta referentnu i mjernu valnu duljinu. IC svjetlo referentne valne duljine voda slabo apsorbira, za razliku od IC svjetla mjerne valne duljine. Na izlazu foto-osjetljivog detektora dobivamo dva impulsa, referentni i mjerni čija amplituda

ovisi o količini vlage u mjerenom uzorku. Metoda je ograničena na prozirne tekućine i plinove koji ne sadrže dodatne komponente koje bi mogle utjecati na apsorpciju infracrvenog zračenja. [5]

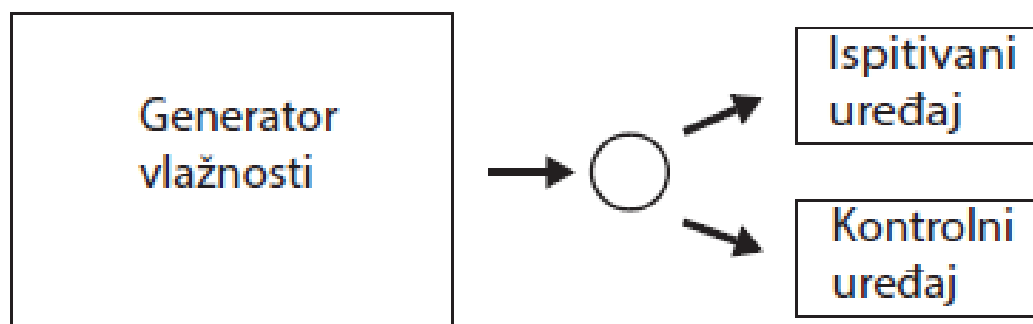
5. METODE UMJERAVANJA MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI I HIGROMETARA TOČKE ROSE

5.1. Uvod

U ovom poglavlju opisat ću postupke mjerenja i umjeravanja mjerila relativne vlažnosti koja se provode u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Glavni zadatak jest umjeravanje u niskotemperaturnom području od -70 do 5 °C te u visokotemperaturnom području od 1 do 60 °C. Procedure koje će u nastavku biti opisane primjenjive su za usporedbu umjeravanja pretvornika vlage, higrometara sa osjetnicima, temperaturnih higrometara i higrometara s jedinicom za snimanje podataka unutar raspona relativne vlažnosti od 5 do 90% .

5.2. Umjeravanje generatorom točke rose (dew-point generation, dpg)

Primarni generator vlažnosti jednotemperaturnog/jednotlačnog principa zasićuje plin pri zadanoj temperaturi i dovodi u izravnu vezu temperaturu u saturatoru s temperaturom točke rose koja se mjeri. Zasićeni plin se direktno šalje do osjetnika temperature točke rose koji se umjerava. Na slici 10 je prikazana shema umjeravanja generatorom točke rose.



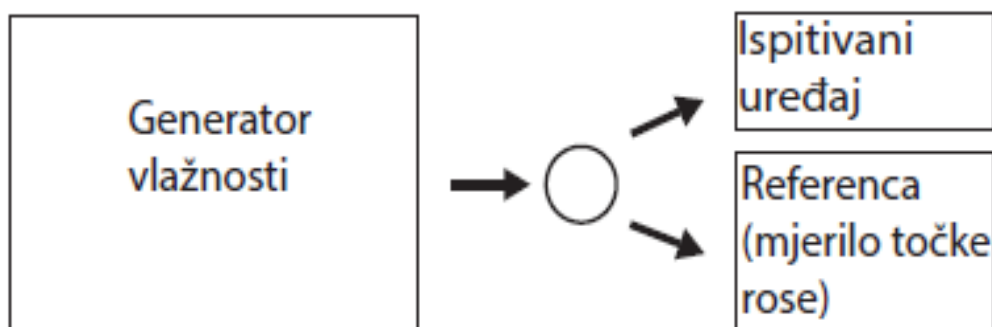
Slika 10 Shema umjeravanja generatorom točke rose

Ključna izmjera je temperatura zasićenja. Tlak se drži na nivou atmosferskog tlaka i mjeri se pad tlaka između saturatora i senzora koji se umjerava te se vrši korekcija rezultata. Ako je temperatura točke rose blizu ili iznad okolišne temperature, sustav cijevi kroz koje ide plin se zagrijavaju.

5.3. Usporedbeno umjeravanje mjerenjem temperature točke rose (dew-point measurement, dpm)

U usporedbi umjeravanja mjerenjem temperature točke rose, jedina uloga generatora vlažnosti je da bude stabilni izvor zasićenog zraka. Stvarna vrijednost temperature točke rose se mjeri referentnim

mjerilom temperature točke rose. Sljedivost se ostvaruje tako da se usporedno umjeri na primarnom generatoru temperature točke rose što se vidi iz shematskog prikaza na slici 11.



Slika 11 Shema usporednog umjeravanja točkom rose

Tlak se drži na razini atmosferskog i razlike u padu tlaka (između saturatora i uređaja koji se umjerava, te između saturatora i referentnog mjerila temperature točke rose) se određuju i vrši se korekcija odgovarajućih rosišta. Za uređaje koji se umjeravaju i manje su točni, razlika u padu tlaka se može uključiti kao komponenta mjerne nesigurnosti. Ako je temperatura točke rose blizu ili iznad okolišne temperature, sustav cijevi kroz koje ide plin se zagrijavaju.

Mjerilo uređaja koje se umjerava i referentno mjerilo temperature točke rose se također mogu povezati u seriji (jedan iza drugog na istoj liniji). U tom slučaju relevantna rosišta se moraju odvojeno prilagoditi za odgovarajuće ispitne tlakove.

5.4. Umjeravanje mjerenjem temperature točke rose i ispitnih temperatura

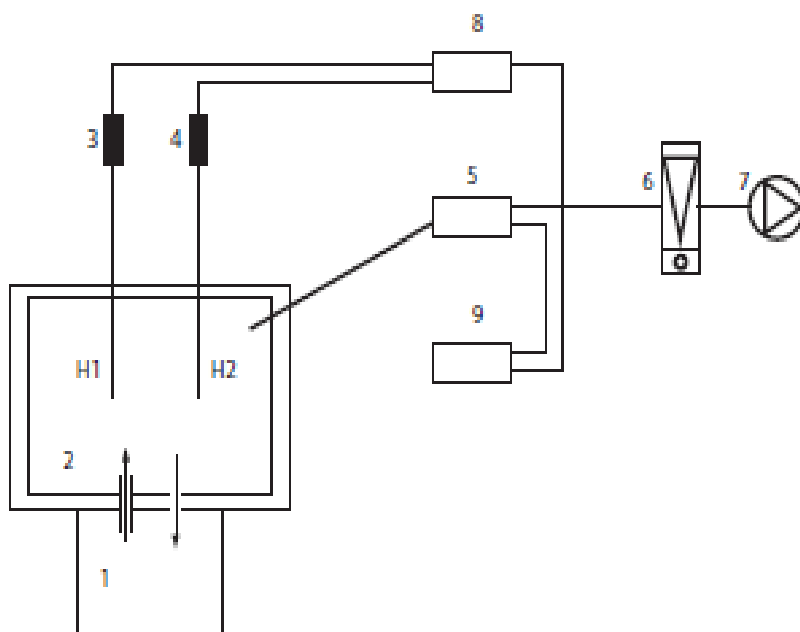
Pri usporednom umjeravanju mjerenjem temperature točke rose i ispitnih temperatura, mjerilo relativne vlažnosti (IU-ispitivani uređaj) je smješteno u radnom prostoru okolišne komore. Jedina svrha komore je da omogući okoliš u kojem se može kontrolirati relativna vlažnost.

Referentni standardi za određivanje referentnih vrijednosti relativne vlažnosti su:

- Umjereni higrometar točke rose čije je ogledalo (osjetnik) smješteno u radnom prostoru komore u blizini IU-a. On mjeri temperaturu točke rose u neposrednoj blizini IU-a.
- Otpornički termometri od platine (POT), po jedan za svaki IU, za mjerenje ispitne temperature npr. temperature kojoj je izložen IU.

- Referentna vrijednost relativne vlažnosti se izračuna na temelju izmjerene točke rose i ispitne temperature IU-a. Glavne komponente nesigurnosti kod ove metode su mjerenja temperature točke rose i mjerenja ispitnih temperatura.

Princip klimatske komore se temelji na 2-T generatoru vlažnosti (1), na slici sa termo-izolacijskom ispitnom komorom (2). Radi sa zrakom i unutarnjim tlakom blizu atmosferskog tlaka.



Slika 12 Shema umjeravanja mjerenjem temperature točke rose i ispitne temperature

Pokusni sistem komore za mjerenje točke rose sastoji se od pumpe (7) i ogledala (osjetnika) s pokazivačkom jedinicom. Ovisno o korištenom instrumentu glava ogledala može biti smještena unutar same komore ili u kućištu pokazivačke jedinice. Protok kroz glavu ogledala se kontrolira s postavljenim rotametrom (6).

U blizini svakog IU-a (higrometra) postavlja se umjereni otpornički termometar (POT) za mjerenje temperature IU-a. Blizina POT-a odgovarajućem IU-u je nužna kako bi se umanjili utjecaji temperaturnih gradijenata u ispitnoj komori te gradijenti relativne vlažnosti uzrokovanih temperaturom. Kako bi se osigurala najmanja moguća temperaturna razlika između POT-a i IU-a, otpornički termometar se može:

- Postaviti vrlo blizu IU i zaštititi od izmjene topline zračenjem odgovarajućim ekranom, ili
- Fizički spojiti (povezati) s IU-om i zaštititi od izmjene topline zračenjem odgovarajućim ekranom, ili
- Postaviti u perforirani ekran zajedno sa IU-om

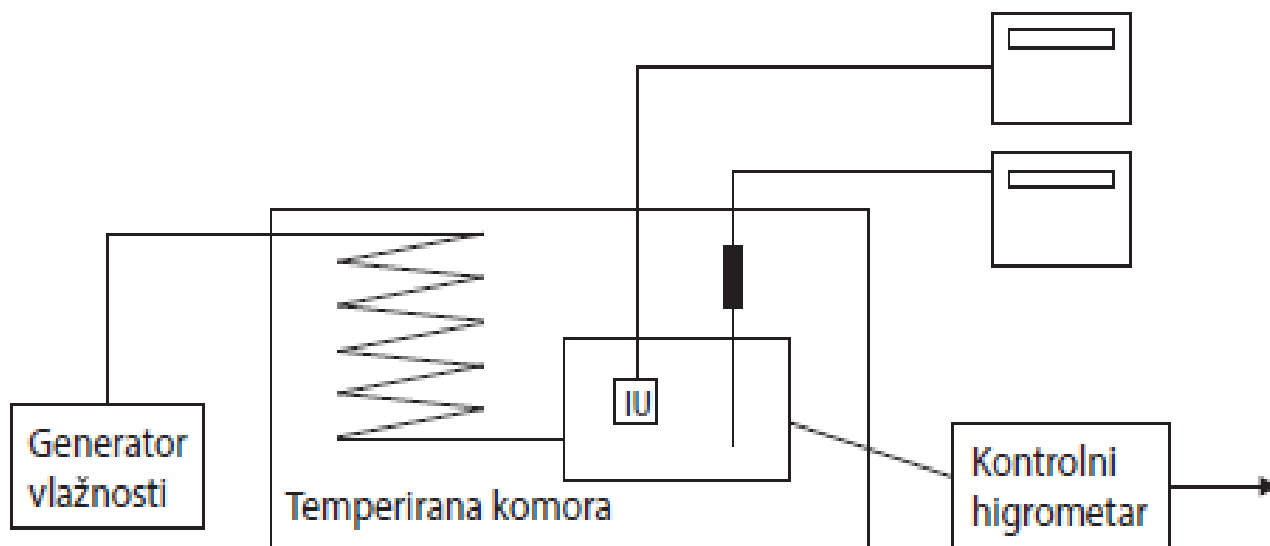
Otpornički termometri su povezani sa mostom termometara (8) i s pokazivačkom jedinicom ogledala na računalo (9). Referentna vrijednost relativne vlažnosti se izračuna uz pomoć izmjerene temperature točke rose (izmjerene ogledalom) i ispitne temperature komore(3,4) na svim mjernim mjestima (H1, H2,...). [3]

5.5. Metoda umjeravanja generiranjem relativne vlažnosti

Ovu metodu umjeravanja ćemo razraditi kao konstrukciju koja će činit liniju za kontrolu osjetnika relativne vlažnosti.

Vlažni zrak poznate temperature točke rose i tlaka se stvara u generatoru vlažnosti jedinstvenog tlaka i temperature prikazanog na slici 13. Nakon toga se vlažni zrak vodi do male ispitne komore kontrolirane temperature (ili nekoliko komora spojenih paralelno ili serijski) gdje se smješta osjetnik za umjeravanje. Moraju se obaviti dodatne izmjere temperature i tlaka zraka u blizini osjetnika koji se umjeruje (IU). Regulacija temperature male ispitne komore se postiže tako da se postavi u veću komoru kontrolirane temperature ili se može uroniti u umjernu kupku. Drugi slučaj je pogodniji za manje osjetnike sa odvojenim pokazivačkim jedinicama koji se mogu u potpunosti uroniti u komoru za umjeravanje.

Glavne komponente nesigurnosti kod ove metode su povezane s mjerenjem temperature i tlaka točke rose i s mjerenjem ispitnih temperatura i tlakova. [4]



Slika 13 Umjeravanje generiranjem relativne vlažnosti

6. GENERATORI RELATIVNE VLAŽNOSTI

6.1. Uvod

Osnova generatora vlažnosti je saturator. Načelno, ispitni plin (najčešće zrak) je u termodinamičkoj ravnoteži sa vodom ili zrakom u saturatoru. Stoga se temperatura točke rose plina u saturatoru (t_s) može jednostavno odrediti mjerenjem temperature u saturatoru.

Molni udio vodene pare u saturatoru ovisi o temperaturi i tlaku u saturatoru:

$$x_{ws} = \frac{f(p_s, t_s)e_w(t_s)}{p_s}$$

Gdje je:

$e_w(t_s)$ – parcijalni tlak čiste vodene pare pri temperaturi zasićenja

$f(p_s, t_s)$ – faktor povećanja procijenjen pri temperaturi i tlaku zasićenja

t_s – temperatura u saturatoru

p_s – tlak plina u saturatoru

x_{ws} – molni udio vodene pare u saturatoru

Na izlazu iz saturatora, molni udio vodene pare ovisi o izlaznoj temperaturi i izlaznom tlaku:

$$x_{wd} = \frac{f(p_d, t_d)e_w(t_d)}{p_d}$$

$e_w(t_d)$ – parcijalni tlak čiste vodene pare pri izlaznoj temperaturi

$f(p_d, t_d)$ – faktor povećanja procijenjen pri izlaznoj temperaturi i tlaku

t_d – izlazna temperatura

p_d – izlazni tlak plina

x_{wd} – molni udio vodene pare na izlazu iz saturatora

Ako pretpostavimo da se molekule plina (uključujući i molekule vodene pare) ne apsorbiraju/adsorbiraju ili desorbiraju zidovima ili praznim prostorima u struji plina između saturatora i izlaza, molni udio vodene pare ostaje nepromijenjen:

$$x_{ws} = x_{wd} \Rightarrow f(p_d, t_d)e_w(t_d) = \frac{p_s}{p_d}f(p_s, t_s)e_w(t_s)$$

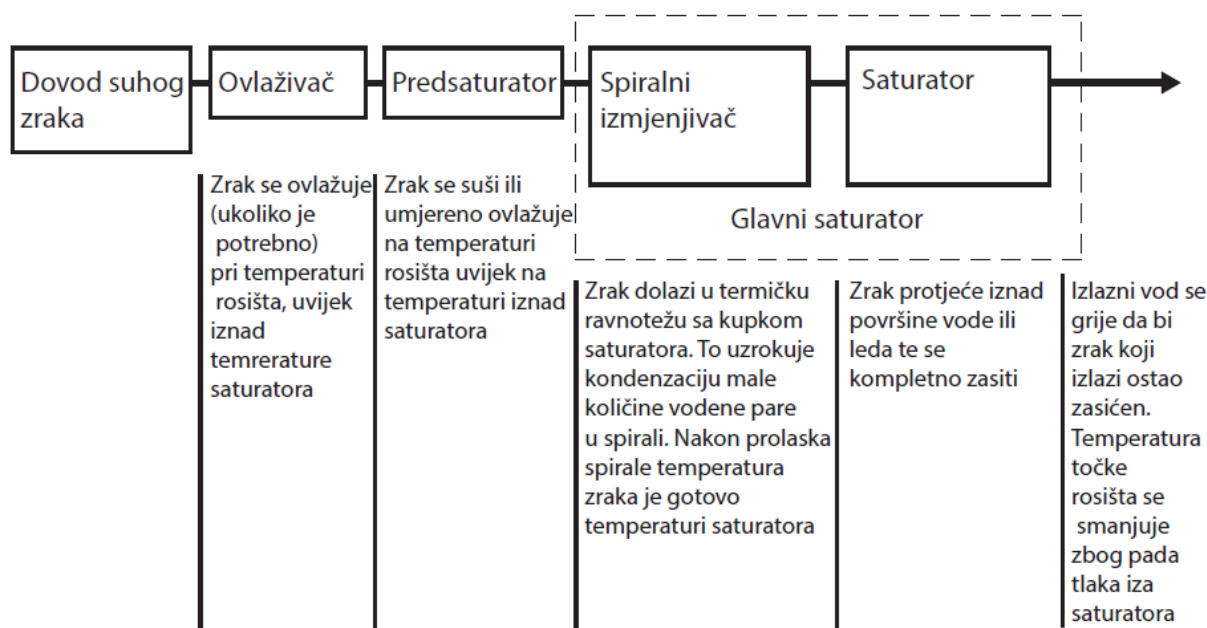
Ova jednadžba pokazuje da se za određivanje temperature točke rose na izlazu iz saturatora, u idealnim uvjetima moraju znati:

- temperatura u saturatoru
- tlak u saturatoru
- tlak na izlazu iz saturatora

6.2. Način rada generatora vlažnosti

U slučaju generatora u LPM-u, oba su konstruirana kao jednotlačni-jednoprolazni generatori vlažnosti - uzorak plina prolazi kroz saturator samo jednom i točka rose je kontrolirana samo temperaturom saturatora. Kod oba generatora ispitna komora je u potpunosti potopljena u kapljevitu kupku. Kako bi se umanjili efekti stijenke cijevi, cijevi kroz koje struji plin su napravljene od nehrđajućeg čelika poliranog s unutarnje strane. Jedine iznimke su cijevi izmjenjivača topline gdje hrapavija površina doprinosi boljoj kondenzaciji.

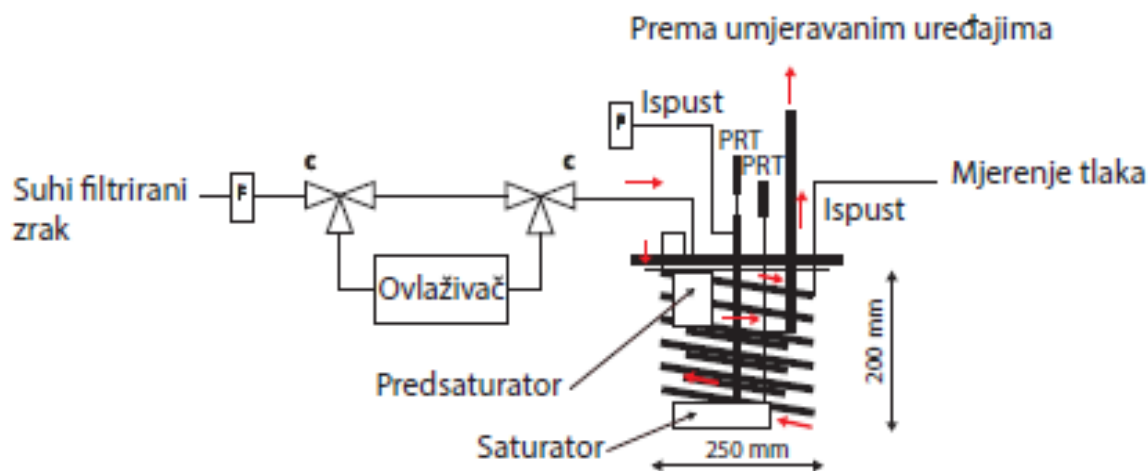
Iako su saturatori konstruirani za rad sa zrakom, mogu se koristiti i drugi plinovi. U našem slučaju koristi se zrak u generatorima. Zrak se prvo komprimira u bezuljnom stapnom kompresoru. Kako bi se smanjile oscilacije tlaka uslijed punjenja i pražnjenja spremnika zraka u kompresoru, nakon kompresora je postavljen dodatni, puno veći spremnik. Nakon toga se zrak suši u adsorpcijskom sušaču i filtrira na dodatnom filteru. Ovim postupcima dobivamo suhi zrak bez čestica (većih od 10 nm) tlaka 0,7 Mpa i otprilike -40°C točke zamrzavanja. Naposljetku, zrak se dijeli u dvije paralelne cijevi. Jedna cijev opskrbljuje niskotemperaturni, a druga visokotemperaturni generator. U obje cijevi protok zraka se može reducirati na željenu razinu uz pomoć regulatora. Saturatori se pripremaju uvođenjem pročišćene i deionizirane vode. Niskotemperaturni generator je konstruiran za rad kod protoka od 1,0 l/min do 2,5 l/min, dok visokotemperaturni radi pri protocima između 2,0 l/min i 2,6 l/min. [4]



Slika 14 Shema termodinamičkih procesa u saturatoru

6.3. Niskotemperaturni generator vlažnosti – NGV

Shema rada niskotemperaturnog generatora vlažnosti prikazana je na slici, sa označenim dijelovima i okvirnim dimenzijama.



Slika 15 Shema rada niskotemperaturnog generatora vlažnosti

Niskotemperaturni generator vlažnosti je konstruiran za rad u temperaturnom području od -70 do +5 °C. Dva otpornička termometra od platine (POT) mjere temperature zasićenja. Jedan mjeri temperaturu zaleđivanja saturatora dok je drugi uronjen u alkoholnu kupku.

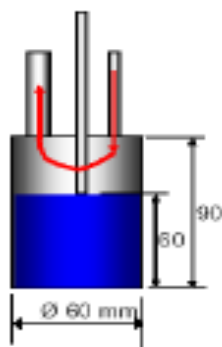
Prvo se zrak ovlaži na temperaturi zasićenja malo iznad temperature kupke saturatora. Nakon toga, se zrak suši prolazeći kroz spiralni izmjenjivač. Kompletно zasićenje se osigurava kontaktom zraka sa vodom ili ledom saturatora. Zrak se zatim brzo izvlači izlaznim vodom da bi se izbjegla kondenzacija u izlaznoj cijevi blizu ili iznad površine kupke (za vrijeme zaleđivanja vode u saturatoru).

Temperatura u saturatoru se mjeri pomoću dva otpornička termometra (POT) kao što je već navedeno, od kojih je jedan uronjen u kapljevitu kupku izvan saturatora, a drugi je smješten unutar saturatorske komore u direktnom kontaktu s vodom ili ledom. Taj drugi termometar je uložen kroz cijev omogućujući jednostavnu kalibraciju termometra. Izlazna cijev je grijana kako bi se izbjegla kondenzacija u njoj.

Saturator ima cijev za ispušt da se može lagano prazniti. Predsaturator se može lagano puniti kroz cijev za dotakanje.

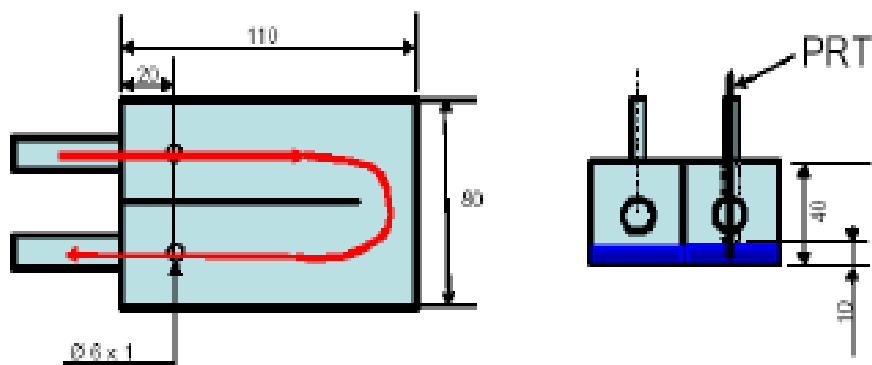
Ovlaživač se sastoji od 'by-pass' cijevi i spremnika s vodom i uključnim ventilom. Kada je potrebno ovlaživanje (npr. kada je temperatura saturatora blizu gornje granice raspona), otvara se ventil i dio zraka ulazi kroz spremnik i miješa se s ostalim zrakom.

Cijevi spiralnog izmjenjivača topline su izrađene od nehrđajućeg čelika promjera 10 i 12 mm te su povezane Swagelok priključcima i Whitey ventilima.



Slika 16 Predsaturator niskotemperaturnog generatora vlažnosti

Predsaturator NGV-a je jednostavna cilindrična posuda, djelomično uronjena u kapljevitu kupku u okomitom položaju, prikazana na slici. I ulaz i izlaz zraka su na vrhu posude. Ledom (ili vodom) je samo djelomično napunjen predsaturator. Razina leda se kontrolira razinom vode kada je temperatura u saturatoru iznad 0°C što se postiže uz pomoć odvodne cijevi, smještene na sredini posude, čiji donji kraj upravlja razinom vode.



Slika 17 Posuda saturatora niskotemperaturnog generatora vlažnosti

U komori saturatora prikazanoj na slici, zrak struji iznad površine leda (ili vode) osiguravajući potpuno ovlaživanje. Saturatorska komora je relativno jednostavna horizontalna posuda s jednom pregradom koja osigurava duži put zraka koji struji iznad vode/leda, koji prekriva dno. Put zraka u saturatoru je oko 200 mm. U saturator ulaze dvije vertikalne cijevi, jedna je namijenjena za ulaz termometra, a druga za mjerilo tlaka i za upravljanje razinom leda (ili vode) unutar saturatorske komore.

Zrak se izvlači iz komore uz pomoć kratkog spiralnog izmjenjivača topline kako bi se spriječila kondenzacija na izlaznoj cijevi u blizini površine kapljevite kupke ili iznad (tijekom zamrzavanja vode u komori). Nakon saturatorske komore, temperatura točke rose se smanjuje samo uslijed pada tlaka zraka.

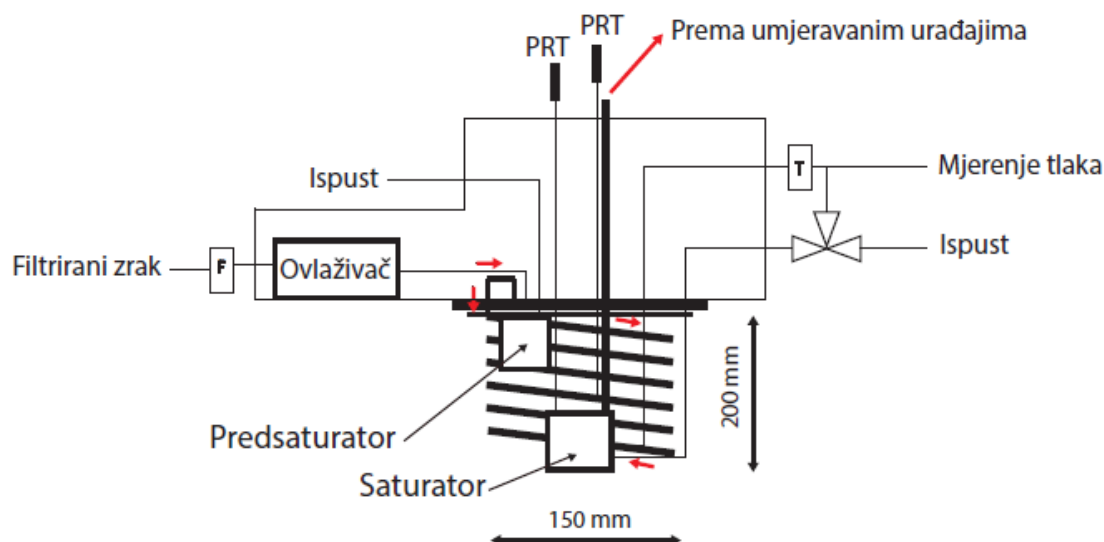
Pri radu niskotemperaturnog generatora blizu gornje granice područja rada (injište/rošište iznad -15°C), predsaturator nije dovoljan budući da je ulazni zrak koji je prethodno bio u adsorpcijskom sušaču, injišta od oko -40°C . Stoga se prije saturatora postavlja inicijalni ovlaživač kako bi se postigli bolji rezultati. Inicijalni ovlaživač je spremnik djelomično napunjen vodom, smješten iznad kupke na okolišnoj temperaturi. Sav zrak na izlazu iz sušača je podijeljen na dva otprilike jednaka dijela kroz dva sustava cijevi, jedan sustav sa dodatnim ovlaživačem, a drugi sa spiralnom cijevi. Struje zraka iz ta dva sustava cijevi se miješaju prije predsaturatora jednostavnim spajanjem cijevi T-spojem. Kako bi se osigurao omjer od otprilike 50% zraka koji ide na dodatni ovlaživač, duljina spiralne cijevi je podešena tako da se postigne jednak pad tlaka u oba dijela.

Nakon ovlaživanja (ako je potrebno) zrak ulazi u predsaturator, gdje se suši (ili ovlažuje, ovisno o području) na temperaturu točke rose malo iznad temperature saturatora.

U spiralnom izmjenjivaču topline se hladi zrak do temperature kupke. Tijekom hlađenja, zrak ispušta višak vlage u obliku vode ili leda. Na kraju spiralnog izmjenjivača, temperatura točke rose zraka je približno jednaka temperaturi u saturatoru.

6.4. Visokotemperaturni generator vlažnosti – VGV

Shema visokotemperaturnog generatora vlažnosti – VGV prikazana je na slici sa pratećim djelovima i okvirnim dimenzijama.



Slika 18 Shema rada visokotemperaturnog generatora vlažnosti

Visokotemperaturni generator vlažnosti konstruiran je za rad u području temperaturu od 1 do 60 °C. Budući da saturator radi u temperaturnom režimu koji je viši od okolišne temperature, sve cijevi se nalaze unutar izoliranog i grijanog kućišta. Temperatura unutar kućišta je kontrolirana sustavom grijanja koji se sastoji od ventilatora, grijača, termometra i regulatora.

Prvo se profiltrirani zraka vodi na inicijalni ovlaživač gdje se ovlažuje do temperature točke rose koja je iznad temperature saturatora. Inicijalni ovlaživač je djelomično napunjena posuda s vodom smještena unutar grijanog kućišta. Nakon izlaska iz inicijalnog ovlaživača, zrak ulazi u predsaturator gdje se suši do temperature točke rose malo iznad temperature saturatora.

Visokotemperaturni saturator je vrlo sličan niskotemperaturnom saturatoru. Razlike su u tome što je visokotemperaturni predsaturator u potpunosti potopljen u kapljevitu kupku te mu je razina vode niža nego u niskotemperaturnom saturatoru. Razlog tome je što visokotemperaturni saturator prvenstveno uklanja višak vode, dok niskotemperaturni prvenstveno ovlažuje zrak.

U spiralnom izmjenjivaču topline, zrak se dovodi u temperaturnu ravnotežu s kupkom u saturatoru što uzrokuje kondenziranje male količine vodene pare na spirali. Nakon prolaska kroz spiralni izmjenjivač topline, temperatura točke rose zraka je otprilike jednaka temperaturi u saturatoru.

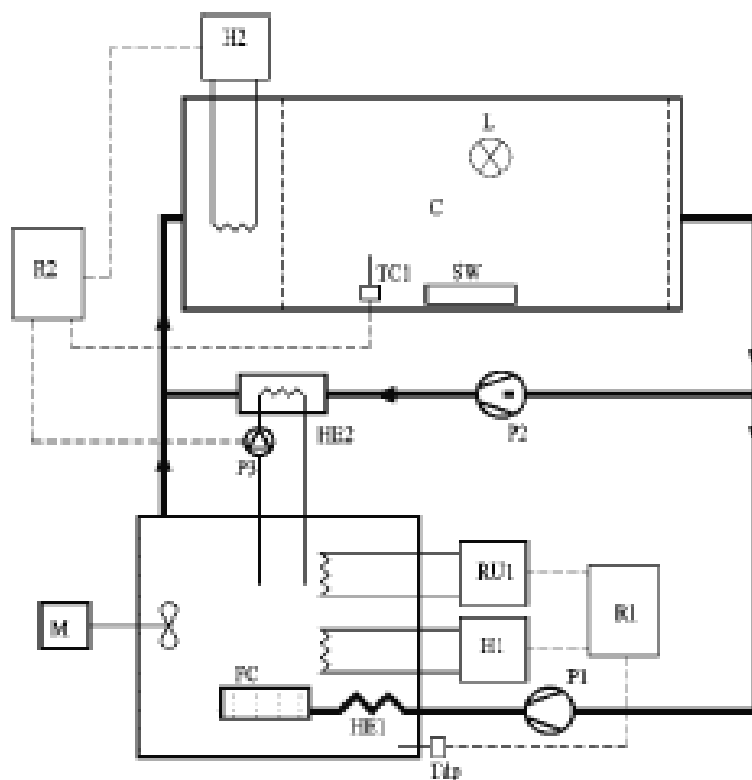
Naposljetku, potpuna saturacija je osigurana prolaskom zraka u direktnom kontaktu s vodenom površinom u komori saturatora. Komora saturatora je horizontalna posuda veoma slična komori niskotemperaturnog saturatora. Put koji zrak prelazi u saturatoru je oko 200 mm. Dvije vertikalne cijevi ulaze u komoru saturatora, jedna je namijenjena kontroliranju razine vode u saturatoru, a druga omogućuje mjerenje tlaka unutar saturatora.

Ovlaženi zrak se povlači iz komore saturatora kroz vertikalnu izlaznu cijev. Izlazna cijev je također grijana kako bi se spriječila kondenzacija ovlaženog zraka. Iz istog razloga je grijana i izlazna cijev zraka iz kućišta.

Kako bi se odredila temperatura u saturatoru, koriste se dva termometra i prosječna vrijednost njihovih mjerenja. Oba termometra su uronjena u kapljevitu kupku kroz rupe na grijanom kućištu i smještene u blizini komore saturatora.

6.5. Opis klimatske komore generatora vlažnosti

Ova klimatska komora je u principu recirkulirajući generator vlažnosti s termo-izoliranom komorom (C). Radi sa zrakom i unutarnjim tlakom blizu atmosferskog tlaka. Cijela shema klimatske komore generatora vlažnosti s njenim popratnim dijelovima prikazana je na slici



Slika 19 Shema klimatske komore generatora vlažnosti s njenim popratnim dijelovima

Zatvorena petlja cirkulirajućeg zraka se sastoji od saturatora sa sustavom grijanja i hlađenja spojenog na regulator i dodatna zaobilazna petlja koja rasterećuje glavnu plinsku petlju od pretjeranog grijanja i hlađenja uslijed relativno velike ispitne komore.

Mjehurićasti tip saturatora je omotan izolacijom, nepropusan, sa kupkama regulirane temperature ispunjene demineraliziranom vodom (oko 30 litara) i motornim mješačem M. Protok zraka se kontinuirano dovodi s centrifuglanom pumpom P1, koja omogućuje stabilan protok. Struja zraka protiče kroz cijevni izmjenjivač HE1 te zatim u filter FC, gdje se razdvaja u puno malih mjehurića i postaje zasićena na postavljenu temperaturu točke rose na regulatoru. Regulacija temperature na saturatoru se sastoji od jedinice za hlađenje RU1, promjenjivog električnog grijača H1, otporničkog termometra od platine T_{dp} i digitalnog regulatora R1.

Nakon saturatora, zrak prolazi kroz kratku, termalno zaštićenu cijev do promjenjivog grijača H2, gdje se zagrijava do ispitne temperature komore koju kontrolira regulator. Cijeli sustav je projektiran da radi bez kondenzacije. Komora za mjerenje je termo-izolirana. Ima relativno velik radni prostor (oko 200 litara). Može primiti nekoliko osjetnika i higrometara (bez daljinski povezivih osjetnika) u isto vrijeme. Komora također sadrži vrata s duplim izolirajućim staklenim prozorom, SW. Unutar komore se nalazi i svjetlo male toplinske vrijednosti čija je svrha osvjetljavanje instrumenata u komori. Ventilator unutar mjerne komore služi za ujednačavanje temperature komore. Kontrola temperature komore se provodi uz pomoć POT-a, TC-1, promjenjivog električnog grijača H2, i digitalnog regulatora R2. Komora za umjeravanje C, ima i dodatni zaobilazni krug koji se sastoji od aksijalnog ventilatora P2, izmjenjivača HE2 i ponovno grijača H2. Ovaj krug se koristi za rasterećenje glavnog kruga od pregrijavanja i pothlađivanja zbog relativno velike izolirajuće mase i velike mase ispitivanog uređaja. Druga svrha je mogućnost regulacije protoka zraka u zoni ispitivanja bez velikog zadiranja u glavnu struju zraka koja dolazi iz saturatora. Kondenzacija na hladnjaku HE2 u zaobilaznoj petlji riješena je hlađenjem preko međukruga na kojem je jedinica za hlađenje RU1. Preko njenog isparivača hladi se voda saturatora. Ova voda se zatim upumpava s međupumpom P3, u hladnjak HE2. Zbog temperaturnog gradijenta u međukrugu, dobava istog je riješena preko cijevnog hladnjaka čija je temperatura uvijek iznad temperature zasićenja sustava i time se izbjegava kondenzacija. Protok u međukrugu je također kontroliran regulatorom ispitne komore R2, koji može koristiti HE2 da uravnoteži grijač H2 sa svrhom bolje kontrole temperature komore. [3]

7. POSTUPAK UMJERAVANJA HIGROMETARA TOČKE ROSE

7.1. Priprema

Fizički proces umjeravanja započinje zaprimanjem uređaja kojeg treba umjeriti. Nakon toga potrebno je ispuniti obrazac sa relevantnim podacima o ispitivanom uređaju (IU) i mjerne točke na kojima će biti ispitivan. Podaci se bilježe i u digitalnom obliku na osobnom računalu.

7.2. Vizualni pregled ispitivanog uređaja

Odmah pri zaprimanju IU-a potrebno je vizualnim pregledom ustanoviti ispravnost zaprimljenog IU-a kao mjeru predostrožnosti. Ukoliko se ustanove bilo kakva oštećenja potrebno je obavijestiti pošiljaoca IU-a.

7.3. Mjerne točke kod umjeravanja higrometara točke rose

Mjerenja se provode na nominalnim temperaturama rosišta/ledišta. Mjerne točke se određuju počevši od nižih prema višima. Kod umjeravanja pri niskim temperaturama potrebno je više vremena zbog stabiliziranja uvjeta u generatoru i SHO-u (SHO – senzor s hlađenim ogledalom, eng. chilled mirror sensor – CMS). Za temperature iznad 0 °C najniža temperatura rosišta je 1 °C. Točke zaleđivanja između -10 i 0 °C se postižu tako da im se približavamo s nižih temperatura kako bi bili sigurni da se poštuje procedura približavanja točkama zasićenja s nižih temperatura.

7.4. Priprema generatora

Generator mora biti spojen i napunjen prema zahtjevima. Filtrirani i sušeni zrak se koristi kao radni medij za NGV. Mora imati -60 °C (ili najviše -40 °C) da se spriječi moguće stvaranje leda na ulazu u saturator. Nadalje kada se ovlaženi zrak zaledi, u njemu se formiraju kristali što nikako nije povoljno. Najvažnije je u NGV-u razlike temperatura zraka i temperatura rosišta budu minimalne. Za VGV se koristi filtrirani zrak. Nakon servisa sušača zraka potrebno je ispustiti sav zrak prije spajanja na NGV. Saturator se puni sa demineraliziranom vodom kojoj bi trebalo kontrolirati čistoću svakih 6-12 mjeseci. Prije upotrebe potrebno je provjeriti da li je NGV prepunjen, te se kupka NGV-a treba pokriti kako bi se usporilo njeno onečišćenje.

7.5. Protoci zraka

Kada umjeravamo ili ispitujemo ponašanje saturatora i njegovu učinkovitost sa referentnim higrometrom, protok kroz SHO mora biti konstantan. Kod NGV-a protok kroz saturator mora biti između 1 i 2 l/min. U slučaju da je protok prevelik za IU jednostavno se višak vlažnog zraka ispusti. Oko cijevi termometra protok treba biti umjeren da bi minimizirali pogreške pri mjerenju temperature. U cijevi koja povezuje saturator i IU protok mora biti ujednačen. Kada se protok

promjeni potrebno je nekoliko sati da bi se uvjeti u NGV-u stabilizirali. Zbog toga se protok u saturatoru za vrijeme umjeravanja mora držati konstantnim.

Kod VGV-a protok je u rasponu od 1,6 do 2,5 l/min. Ukoliko bi protok bio ispod 1,6 l/min ne bi bilo dovoljno turbulencije u ovlaživaču. Ako higrometar koji umjeravamo zahtjeva manji protok, npr. 0,5 l/min, to rješavamo tako da razdvojimo tok zasićenog zraka prema potrebi umjeravanog higrometra. Sva mjerenja protoka moraju se obavljati na izlaznim vodovima sustava (izlazima IU-a, referentnog higrometra, ispuštima). Ako u sustavu postoje slijepi vodovi oni ne bi trebali biti potpuno zatvoreni. Kod VGV-a uvijek treba omogućiti mali protok kroz ispuste.

7.6. Tlakovi

Nakon što je sustav za umjeravanje postavljen moraju biti provjereni svi spojevi kako bi se spriječila eventualna curenja. To se izvodi tako da opteretimo sustav sa tlakovima od 300-500 mbar i neko vrijeme nadgledamo sustav. Curenja saturatora također se mogu detektirati pojavom mjehurića zraka u kupki. Pad tlaka između IU i saturatora, $\Delta P = P_d - P_s$, je funkcija protoka i temperature rosišta, $\Delta P = f(q, t_d)$. Razlika tlaka se mjeri između vrha posude saturatora i ulaza IU-a. Pad tlaka IU-a se može odrediti i zabilježiti prije mjerenja pomoću temperature rosišta i protoka te prilagoditi prema uvjetima umjeravanja, čime se kompletno može ukloniti pad tlaka. Kod NGV-a, elektropolirana cijev između saturatora i IU ne smije imati padove tlakova. Mjerenje tlaka i protoka za vrijeme umjeravanja dozvoljena su samo na izlazu iz IU-a. Korekcije apsolutnih tlakova kod jednotemperaturnih i jednotlačnih (1T-1P) generatora su zanemarive. Nestabilni tlakovi mogu ometati očitavanja SHO-a. Kod VGV-a ($t_s > t_{okoliš}$) manja opterećenja (oko 20 mbar) u odnosu na okolišni tlak, moraju biti prisutna da bi sustav bio otporan na curenje. Ukoliko su VGV-u osjetnici tlaka izvan grijanih područja, može doći do kondenzacije, što se može riješiti grijanjem cijevi za mjerenje tlaka, cirkulacijom zraka kroz nju ili ju pak izvesti dužom da se izbjegnu zastoji.

7.7. Zahtjevi za cijevi i priključke

Za NGV cijevi moraju biti elektropolirane iznutra. Izlazne cijevi moraju biti umjereno grijane da bi se izbjegla bilo kakva kondenzacija za vrijeme podizanja temperature kupke. Za VGV, cijevi (za slučajeve umjeravanja blizu temperature okoliša, npr. +20 °C i više) moraju biti grijane. Također moraju se poduzeti sve mjere predostrožnosti da bi se izbjegla kondenzacija na priključcima, izbočenim dijelovima, itd. Posebna pozornost mora se posvetiti temperaturi izlaznog priključka zbog toga što on nije dio vanjske grijane cijevi. Cijevi moraju biti grijane na temperaturu višu za 10-20 °C od temperature zasićenja. Za VGV, temperatura cijevi i SHO-a mora biti povišena i stabilizirana puno prije (barem 1 sat) nego što se počne povisivati temperatura saturatora. Temperatura grijanih cijevi između saturatora i IU-a ne bi smjela fluktuirati jer bi to moglo utjecati na točku rosišta zbog

povezanosti s absorpcijom i desorpcijom vlage u cijevima. Taj efekt dolazi do izražaja pri nižim rosištima.

7.8. Priprema IU-a, kontrolnog uređaja ili referentnog higrometra

Za pripremu IU-a i referentnog higrometra potrebno je pročitati njihove upute i mjere predostrožnosti te se posavjetovati s proizvođačem uređaja. Zatim se treba upoznati s načinom rada IU-a. Potom treba pripremiti priključke u sustavu. Nikada se ne smije upaliti SHO u niskotemperaturnom području prije nego što se uspostavi protok kako bi se izbjegle neobične formacije kristala na ogledalu. Prije umjeravanja, IU treba biti na sobnoj temperaturi (23 ± 3 °C) barem 6 sati. IU i prateća oprema trebaju biti uključeni barem 1 sat prije početka umjeravanja. Prije spajanja uređaja na generator vlažnosti, treba provjeriti ispravnost svih dijelova. Uzorak zraka iz generatora dovodi se na ulazni ventila IU-a kroz cijev od nehrđajućeg čelika promjera 6 mm.

7.9. Postupak umjeravanja

Umjeravanje se provodi na nazivnim temperaturama rosišta koje se utvrđuju s naručiocem ispitivanja. Umjeravanja trebaju biti provođena uzlaznim redoslijedom. Poslije pune stabilizacije na najnižoj temperaturi kreće se prema sljedećoj, višoj temperaturi. Za temperature iznad 0 °C, najniža točka zasićenja jest 1 °C. Time se izbjegavaju komplikacije zbog promjene agregatnog stanja. Za točke zaleđivanja između -10 i 0 °C pravilno je približavanje sa puno niže temperature. Za umjeravanje ispod -40 °C potrebno je pričekati nekoliko sati kako bi se osušile cijevi. Za mjerenja iznad -70 °C sušenje cijevi traje 1 do 2 dana. Treba uzeti u obzir ponavljanje mjerenja jedne točke (s niže temperature) kako bi se stekao uvid u sljedivost. Također, ne treba se oslanjati na specifikacije proizvođača. U rasponima temperatura ispod 0 °C, homogeni sloj leda bi trebao prekriti ogledalo. Kondenzat bi se trebao ukloniti nakon svakog ponavljanja točke rose. U VGV-u pri temperaturama iznad okolišnih, glava SHO-a mora biti unaprijed zagrijana, prije povišenja temperature saturatora. Kada se temperatura ogledala izjednači sa temperaturom IU-a treba prekinuti zagrijavanje. U slučaju odvojenih glava SHO-a, cijela glava treba biti grijana u temperiranoj okolini. Ako je ikako moguće, poželjno je uspoređivati tlakove izmjerene higrometrom s tlakom pri mirovanju sustava (nema protoka kroz sustav) te ih zabilježiti. Također je poželjno zabilježiti i okolišnu temperaturu i tlak. Nadalje, ako je moguće, treba provjeriti protok kroz higrometar s mjerilom protoka na tlaku zraka u sustavu za vrijeme mjerenja pri točkama zasićenja. Prije upotrebe IU-a, potrebno je očistiti ogledalo IU-a s alkoholom i destiliranom vodom. Kod hlađenja potrebno je odabrati odgovarajući režim rada (delta, fiksni, ciljani, itd.).

Procedura pri svakoj točki umjeravanja:

- Čekati stabilizaciju mjernog sustava i IU koja se manifestira odsutnošću bilo kakvih sistematskih trendova ili oscilacija mjernih vrijednosti
- Ako je moguće treba ručno optimizirati periode umjeravanja te provjeriti vrijednosti hlađenja itd.
- Ako je moguće treba provjeriti homogenost kondenzata, leda na ogledalu te zabilježiti rezultate. Ako rezultati nisu zadovoljavajući treba provjeriti ispravnost ogledala.
- Izmjeriti i zabilježiti očitavanja IU-a te očitavanja na RS-232 ili IEEE ulazu. Treba bilježiti minimalno 10 mjerenja u periodu od najmanje 10 minuta.
- Mjeriti i zabilježiti očitavanja temperaturnih proba u saturatoru i u kupki.
- Izmjeriti i zabilježiti najveći tlak u saturatoru i na izlaznom ventilu IU-a.
- Zabilježiti ako je moguće i protoke na svim izlaznim vodovima sustava.
- Izmjeriti i zabilježiti temperaturu i tlak okoliša.
- Prije mijenjanja temperature rosišta uzorka zraka potrebno je hladnjak higrometra staviti u delta režim rada.
- Prije sljedećih mjerenja kondenzat mora biti očišćen i ponovno formiran pomoću opcija 'mirror check' i 'mirror cleaning'.
- Na kraju umjeravanja uvijek treba zagrijati ogledalo prije nego ugasimo SHO kod NGV-a da bi izbjegli onečišćenje.
- Nakon gašenja IU-a i kontrolnog/referentnog SHO-a treba ostaviti protok zraka u sustavu 5 do 10 minuta. Također možemo koristiti suhi zrak da bi očistili IU i kontrolni/referentni SHO koji dovodimo na izlaz ovih uređaja. [3]

8. POSTUPAK UMJERAVANJA MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI

8.1. Uvod

Fizički umjeravanje počinje sa zaprimanjem ispitivanog uređaja. Obrasci koji se koriste su standardizirani i nisu tema ovog rada. Sljedeći korak je ispunjavanje tih obrazaca vezanih uz ispitivani uređaj (IU). Zatim se stvaraju datoteke u koje će se upisivati podaci vezani za umjeravanje ispitivanih uređaja.

8.2. Matematičke osnove

Za računanje različitih vrijednosti vlažnosti, koriste se slijedeći izrazi:

Tlak pare zasićenja čiste faze u odnosu na vodu (Sonntag):

$$e_w(t) = \exp(6096,9385 \cdot (273,15 + t)^{-1} + 16,635794 - 2,711191 \cdot 10^{-2} \cdot (273,25 + t) + 1,673952 \cdot 10^{-5} \cdot (273,25 + t)^2 + 2,433502 \cdot \ln(273,15 + t))$$

Ovaj izraz vrijedi u rasponu od -100 do +100 °C. Zbog sastava zraka (mješavina više plinova), korekcija tlaka pare je dana kroz faktor povećanja (Bögel):

$$f_w(p, t) = 1 + \frac{10^{-4} \cdot e_w(t)}{273,25 + t} \cdot ((38 + 173 \cdot e^{-t/43}) \cdot \left(1 - \frac{e_w(t)}{p}\right) + (6,39 + 4,28 \cdot e^{-t/107}) \cdot \left(\frac{p}{e_w(t)} - 1\right))$$

Parcijalni tlak pare (pri temperaturi točke rose i tlaku zasićenja):

$$e' = f_w(p_s, t_d) \cdot e_w(t_d)$$

Tlak zasićenja vodene pare (pri ispitnoj temperaturi i ispitnom tlaku):

$$e'_w(t) = f_w(p, t) \cdot e_w(t)$$

Relativna vlažnost se zatim izračuna prema izrazu:

$$h = \frac{e'}{e'_w} \cdot 100\%$$

8.3. Vizualni pregled ispitivanog uređaja

Odmah po primitku IU-a potrebno je vizualnim pregledom ustanoviti ispravnost IU-a kao mjeru predostrožnosti. Ukoliko se ustanove bilo kakva oštećenja potrebno je obavijestiti pošiljaoca IU-a. Prije postavljanja IU-a u komoru, uređaj ispitujemo u sobi odnosno u okolišu umjeravanja gdje je

komora smještena. Ako razlika relativne vlažnosti između okoliša i IU-a nije prevelika, stanje IU-a se smatra dobrim.

8.4. Mjerne točke kod umjeravanja mjerila relativne vlažnosti

Minimalni standard za umjeravanje se provodi u tri točke različite relativne vlažnosti, počevši od najniže pa prema najvišoj. Broj mjernih točaka može se i proširiti dodatnim točkama s ciljem dobivanja histereze IU-a. Najčešće točke umjeravanja su prikazane u tablici 1.

Tablica 1 Točke umjeravanja

Temperatura zasićenja [°C]	Temperatura ispitne komore [°C]	Relativna vlažnost [%]
14,81	30	40
16,57	25	60
16,31	20	80

Ispitne temperature komore, za specifične relativne vlažnosti, izračunate su prema izabranim temperaturama točke rose pomoću LPM-ovih radnih podloga u Microsoft Excel-u.

8.5. Postupak umjeravanja

Prije umjeravanja, instrument odnosno ispitivani uređaj, mora biti u temperature 23 ± 3 °C najmanje 12 sati.

Pri umjeravanju mjerenjem temperature točke rose i ispitne temperature, bitno je da:

- Zahtijevana temperatura točke rose i ispitna temperatura budu izračunate vodeći računa o sekvencama mjernih točaka.
- Budući da je moguće u komoru staviti istovremeno nekoliko IU-a, treba paziti na njihov raspored unutar komore.
- Za IU-e d integriranim ekranima za očitavanje i grafičkim zapisivačima, smještaj unutar komore mora biti takav da se jasno vidi njihov prikaz.
- Kontrolni uređaj (SHO ili sustav unutarnjeg uzorkovanja) mora biti u najboljoj poziciji naspram IU.
- Protok kroz SHO, koji je referentni standard, je prilagođen istome tako da mu odgovara, a kontrolira se rotametrom koji se nalazi na izlazu sustava uzorkovanja.

- U blizini svakog IU-a potrebno je postaviti referentni termometar. Može se direktno povezati sa osjetnikom IU-a ili ga staviti blizu IU-a. Mogu biti zaštićeni s perforiranim zaslonom koji neće umanjiti cirkulaciju zraka već će stvoriti podzonu i više ujednačiti temperaturu u okolini IU-a.
- Za IU-e spojene sa vanjskim ekranima i čitačima na komori, sa strane se nalaze otvori kroz koje žice takvih uređaja prolaze. Za eksterne dijelove takvih uređaja postoji i dodatna polica sa strane komore. Ti otvori također služe za IU-e sa sučeljima koja su spojena s računalnim ulazima.
- Otvori sa strane komore trebali bi biti zabrtvljeni sa svojevrsnom zaštitom od pamuka u vidu krpa ili čepova, ili pak zabrtvljeni kitom.
- Pri svakoj točki umjeravanja, parametri komore trebaju biti najviše moguće ujednačeni i konstantni (nakon određenog očekivanog perioda vremena) što je prethodno određeno uvjetima ispitivanja, ili prilagođeno IU-u.
- Stabilizacija IU-a se postiže kada njegova očitavanja ne pokazuju nikakvu sustavnu promjenu vrijednosti.
- Mjerenja referentnih temperatura točke rose i ispitnih temperatura slijede mjerenja i i bilježenja od strane IU-a. U slučaju više IU-a na kraju bilježenja očitavanja, referentne vrijednosti se ponovno bilježe.

Pri umjeravanju generiranjem relativne vlažnosti, bitno je da:

- Zahtijevane temperature točke rose i ispitne temperature budu izračunate i da bude isplaniran optimalan razmak između mjernih točaka.
- Osjetnici IU-a su smješteni u maloj ispitnoj komori zajedno s referentnim termometrom te ulazi za IU i referentni termometar moraju biti odgovarajuće zatvoreni.
- Mala ispitna komora može biti smještena u okolišnu prostoriju ili u kalibracijsku kupku. I drugom slučaju, cijeli IU mora biti u potopljenoj komori kako bi se izbjegli temperaturni gradijenti na osjetniku.
- Generator i kupke su postavljeni na odgovarajuće temperature.
- Generator je spojen na malu ispitnu komoru preko odgovarajuće cijevi. Dobavna cijev mora biti grijana ako je temperatura zasićenog zraka slična ili veća od temperature okoliša s tolerancijom od ± 5 °C.
- Kontrolni uređaj referentnih točaka treba biti postavljen na kraju manje ispitne komore kako bi bili sigurni da nije došlo do promjene temperature zasićenja pri umjeravanju u sustavu.
- Protok kroz SHO mora imati nazivnu vrijednost. Preveliki protok rješava se ispuštom.

- Protok kroz sve dijelove sustava mora biti kontroliran rotametrom tako da ukupni protok kroz generator odgovara radnom protoku istog. Također protok mora biti u skladu sa zahtjevima sustava.
- Temperatura klimatske komore mora biti u skladu sa zahtjevima umjeravanja.
- Pri svakoj točki umjeravanja (generator, klimatska komora, mala ispitna komora) moraju se ujednačiti svi uvjeti umjeravanja prema zahtjevima i osobinama IU-a.
- Ujednačenje IU-a se postiže kada su njihova očitavanja sustavna.
- Mjerenja referentnih temperatura točaka zasićenja i ispitnih temperatura bilježe se na IU-ima. Ako ima više IU-a na kraju bilježenja njihova očitavanja se ponovo bilježe.
- Nadgledanje i bilježenje temperatura točaka rosišta kao i mjesta mjerenja temperatura integrirana su preko programske aplikacije bazirane na LabView® platformi. Program za izračunavanje relativne vlažnosti može biti integriran u istu programsku aplikaciju ili pak biti izdvojen u EXCEL podatkovni zapis. Svi bitni podaci (kao što su temperature rosišta, ispitne temperature i izračuni relativne vlažnosti) pohranjuju se na osobno računalo. Ti podaci se stvaraju za svaki IU kao što je objašnjeno na početku ovog poglavlja. Za svaku točku mjerenja najmanje 10 vrijednosti se iščitavaju i zapisuju. Vrijednosti relativne vlažnosti se mogu prikupljati ručno ili preko komunikacijskog ulaza te se zapisuju u isti podatkovni zapis.
- Odstupanje između IU i referentne vrijednosti za svaku mjernu točku je pohranjeno u specifičnoj datoteci za taj IU na osobnom računalu, zajedno sa standardnom devijacijom. [4]

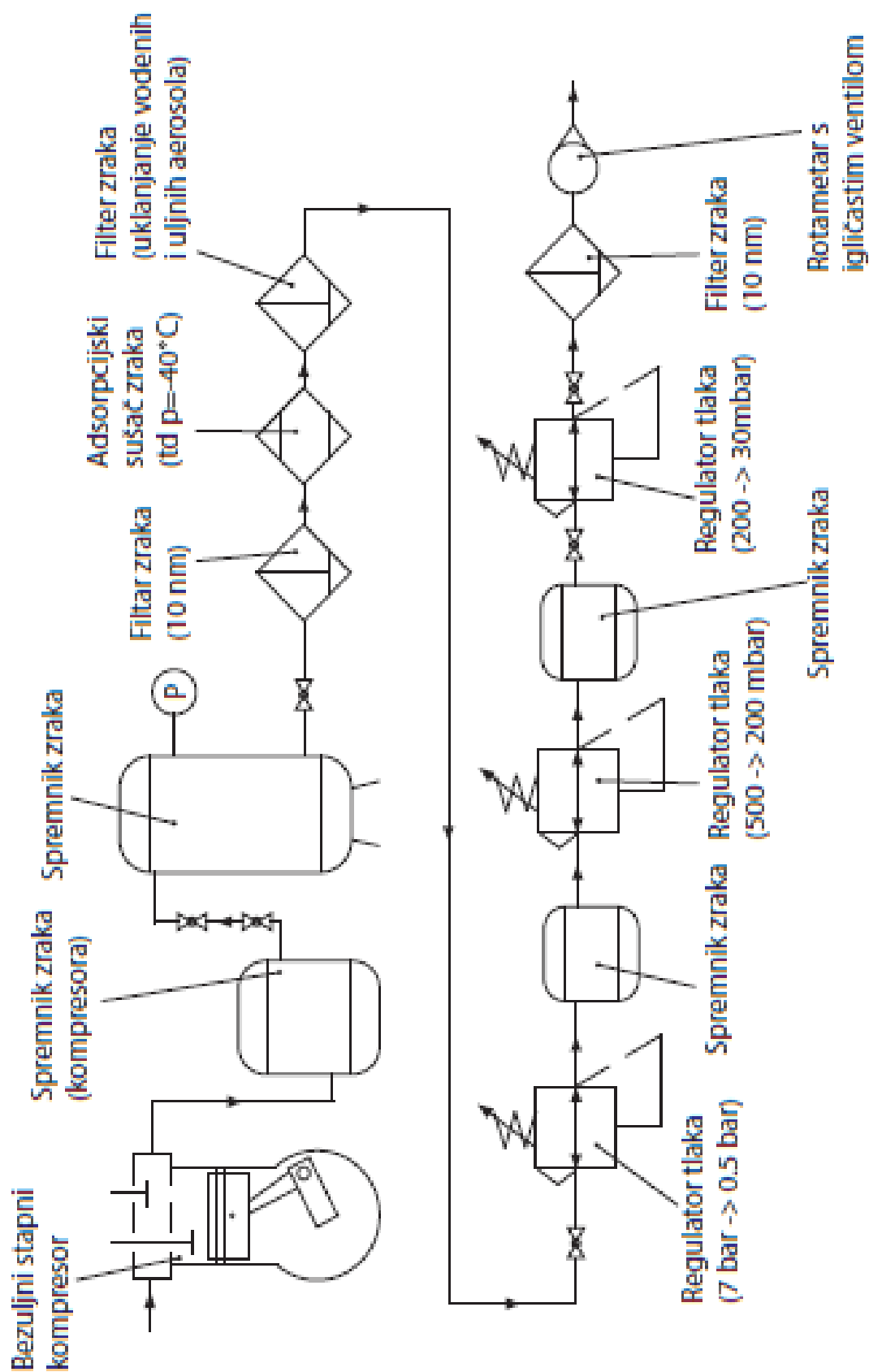
9. PROJEKT TLAČNOG SUSTAVA ZA PRIPREMU, SUŠENJE I MJERENJE PROTOKA PLINA NA GENERATORU

9.1. Uvod

Kako bi generatorima vlažnosti mogli pripremiti zrak željenog rosišta/injišta, na njihov je ulaz potrebno dovesti zrak odgovarajućih svojstava, što se postiže tlačnim sustavom za pripremu zraka. Tlačni sustav za pripremu zraka zajednički je niskotemperaturnom i visokotemperaturnom generatoru vlažnosti.

Jedan od osnovnih zahtjeva koji se postavljaju na zrak koji ulazi u generator jest njegova čistoća, budući da bi nečist zrak mogao poremetiti rad te trajno promijeniti karakteristike generatora. Stoga je sustav za pripremu zraka opremljen bezuljim kompresorom, čime se sprječava onečišćenje zraka kompresorskim uljem. Sustav je nadalje opremljen dvama filtrima, kojima se iz zraka uklanjaju čestice manje od 10 μm . Filtri su izvedeni u dva stupnja pri čemu se u prvom stupnju uklanjaju čestice do veličine 1 μm a u drugom do veličine 0.01 μm . Iako bi za uklanjanje nečistoća jedan filter bio dovoljan, radi sigurnosti je ugrađen dodatni filter. Osim filtra za uklanjanje mehaničkih nečistoća, sustav je također opremljen filtrom za uklanjanje vodenih i uljnih aerosola, krutih nečistoća i mikroorganizama, proizvođača Parker, tip Oil-X. Za pravilno funkcioniranje niskotemperaturnog generatora vlažnosti, ulazni zrak također mora biti suh. Sušenje se postiže adsorpcijskim sušačem proizvođača Dominick Hunter, Model Pneudri Midas DAS2, koji radi na pressure-swing adsorption principu (PSA). Sustavom je također predviđena mogućnost podešavanja željenog tlaka i protoka zraka. Zrak se u generator uvodi s blagim pretlakom, čime se omogućava njegovo strujanje kroz sustav, ali istovremeno sprječava ulazak nečistog zraka kroz eventualne otvore (čisti zrak struji van). Željeni pretlak zraka postiže se u nekoliko stupnjeva, upotrebom mehaničkih regulatora tlaka. Prvo se tlak zraka u spremniku kompresora (7 bar) regulatorom spušta na 0.5 bar, nakon čega se pomoću dva fina mehanička regulatora protoka dovodi na željenu vrijednost koja je obično u granicama od 10 do 100 mbar. Kako bi se, što je više moguće ublažile nagle promjene tlaka u toku rada generatora, sustav je opremljen dvama dodatnim spremnicima zraka, jednim volumena 250 lit te drugim volumena 25 lit. Rotametrom se kontrolira i podešava željeni protok zraka na ulazu u generatore. Rotametar ima ugrađen fini igličasti ventil koji služi za finu regulaciju protoka. Sve je povezano plastičnim fleksibilnim cijevima Festo, model PUN (poliuretan), nazivnog promjera 10 mm. Svi priključci izvedeni su odgovarajućim push-in spojnica proizvođača Festo. Prije rotametra nazivni promjer cijevi je reduciran s 10 mm na 6mm.

Shema cijelog tlačnog sustava za pripremu zraka prikazana je na slici 19.



Slika 20 Tlačni sustav za pripremu zraka

10. PROJEKT KONDENZATORA ZA SUŠENJE ZRAKA

10.1. Uvod

Za potrebe ovog rada, trebalo je pronaći rješenje za sušenje vlažnog zraka prije mjerenja njegovog protoka na rotametu. Naime, kao što je već navedeno u ovom radu, na izlazu iz generatora dobivamo vlažni zrak tražene točke rose. Radi se o zraku temperature $T_1=100^\circ\text{C}$, temperature točke rose $T_{dp1}=70^\circ\text{C}$. Iz ovog zraka potrebno je ukloniti svu vodenu paru kako se ona ne bi iskondenzirala u rotametu jer on nije namijenjen za rad s kapljevinama.

10.2. Potrebna ukupna snaga kondenzatora

Ukupnu potrebnu snagu kondenzatora izračunat ćemo prema slijedećem izrazu:

$$\dot{Q} = q_m \cdot \Delta h$$

\dot{Q} – ukupna potrebna snaga kondenzatora, [W]

q_m – maseni protok zraka, [g/s]

Δh - razlika entalpija ulaznog i izlaznog stanja zraka, [J/g]

U slijedećoj tablici prikazane su potrebne vrijednosti parametara za računanje, koje su dobivene uz pomoć HumiCalc-a.

Tablica 2 Parametri zraka na ulazu i izlazu iz kondenzatora

	Temperatura T, [°C]	Temperatura točke rose T_{dp} , [°C]	Relativna vlažnost RV, [%]	Gustoća, [g/m ³]	Entalpija, [J/g]
Zrak na ulazu, 1	100	70	31	835,052	850,977
Zrak na izlazu, 2	15	15	100	1217,18	42,113

Kako bi izračunali ukupnu potrebnu snagu kondenzatora, potrebno je prvo izračunati maseni protok zraka kroz kondenzator, i to na temelju slijedećeg izraza:

$$q_m = q_v \cdot \rho_s = \frac{3}{1000} \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot 1217,18 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1}{60} \frac{\text{min}}{\text{s}} = 0,06086 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Gdje je $q_v = 3 \frac{L}{min}$ volumni protok zraka kroz kondenzator, a vrijednost je uzeta prema iskustvenim podacima.

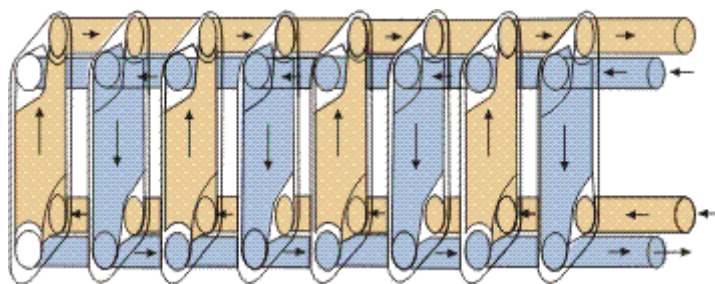
Sada imamo sve potrebne podatke za računanje ukupne potrebne snage kondenzatora pomoću (1) te ona iznosi:

$$\dot{Q} = 0,06086 \frac{g}{s} \cdot (850,977 - 42,113) \frac{J}{g} = 49,2275W$$

Ovaj podatak nam je relevantan pri odabiru kondenzatora kojim će se izkondenzirati vlaga iz zraka.

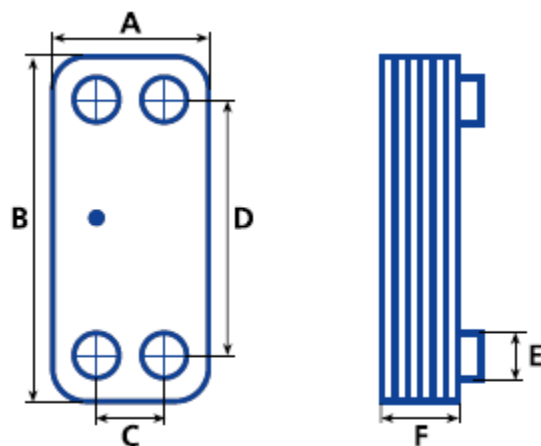
10.3. Proračun kondenzatora

Prije proračunavanja kondenzatora, bilo je potrebno odlučiti se za način kojim će se kondenzirati vlaga iz zraka. Postoji mnogo načina na koje se to može izvesti, i uzevši u obzir nekoliko mogućnosti, na kraju sam se odlučila da ću za kondenziranje vlage iz zraka koristiti postojeći pločasti izmjenjivač topline (proizvođač GEA, serija GNS), kojem je osnovna namjena izmjena topline između dvije tekućine no moguće ga je iskoristiti i u ovu svrhu. Naime, ovo rješenje je dobro u okvirima LPM-a jer potreba za kondenzatorom nije svakodnevna, nego na razini od nekoliko puta godišnje, a ovakvom izvedbom bi se taj kondenzator mogao koristiti i u druge svrhe za kojima bi se pokazala eventualna potreba u laboratoriju.



Slika 21 Princip rada pločastih izmjenjivača

Na slici 21 je prikazan princip rada pločastog izmjenjivača. Kao što će se kasnije pokazati proračunom, potrebe za kondenziranjem vlage iz zraka moći će zadovoljiti pločasti izmjenjivač GEA GNS 100, čiji je tlocrt i bokocrt prikazan na slici 22, dok su u tablici 3. dimenzije tog pločastog izmjenjivača potrebne za njegov proračun, preuzete iz kataloga proizvođača, gdje je N broj ploča izmjenjivača. [9]



Slika 22 Pločasti izmjenjivač GEA serije GNS

Tablica 3 Dimenzije pločastog izmjenjivača GEA GNS 100

Tip	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	Masa [kg]	Max. protok vode [m ³ /h]	Max. broj ploča
GNS 100	74	204	40	170	15	10,23+2,23xN	0,70+0,050xN	4	50

U nastavku će biti prikazani izrazi pomoću kojih se proračunao izmjenjivač topline tj. kondenzator.

Potrebna površina izmjene topline računa se pomoću izraza za ukupnu snagu izmjenjivača topline:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m \rightarrow A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta\vartheta_m}$$

A – površina izmjene toplina, [m²]

Ukupna potrebna snaga izmjenjivača topline \dot{Q} , je izračunata u prethodnom poglavlju i iznosi 49,227 W. Koeficijent prolaza topline k , i logaritamska temperaturna razlika $\Delta\vartheta_m$ se računaju prema slijedećim izrazima:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zr}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_w}}$$

Gdje je:

k – koeficijent prolaza topline, [W/m²K]

α_{zr} – koeficijent prijelaza topline na strani zraka, [W/m²K]

δ – debljina ploče kondenzatora, [m]

λ – koeficijent toplinske vodljivosti materijala kondenzatora, [W/mK]

α_w – koeficijent prijelaza topline na strani vode, [W/m²K].

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_{zr1} - \vartheta_{zr2}) - (\vartheta_{w2} - \vartheta_{w1})}{\ln \frac{\vartheta_{zr1} - \vartheta_{w2}}{\vartheta_{zr2} - \vartheta_{w1}}}$$

Gdje je:

$\Delta\vartheta_m$ – logaritamska razlika temperatura, [K]

ϑ_{zr1} – temperatura vlažnog zraka na ulazu u izmjenjivač, [K]

ϑ_{zr2} – temperatura suhog zraka na izlazu iz izmjenjivača, [K]

ϑ_{w1} – temperatura vode na ulazu u izmjenjivač, [K]

ϑ_{w2} – temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača, [K].

Kako bismo izračunali koeficijent prolaza topline k , potrebno je prvo izračunati koeficijente prijelaza topline na strani vode i na strani zraka, α_{zr} i α_w . Njih ćemo izračunati uz pomoć bezdimenzijskih brojeva, Nusselt-a, Reynolds-a i Prandtl-a prema slijedećim izrazima:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e}$$

$$Nu = C \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,12}$$

$$Re = \frac{w \cdot d_e \cdot \rho}{\eta}$$

$$d_e = \frac{2 \cdot b}{\Lambda}$$

Gdje je:

Nu – Nusselt-ov broj, [-]

λ – koeficijent toplinske vodljivosti, [W/mK]

d_e – ekvivalentni promjer izmjenjivača, [m]

C – konstanta, kod pločastih izmjenjivača, $C = 0,15 \div 0,40$, [-]

Re – Reynolds-ov broj, [-]

Pr – Prandtl-ov broj, [-]

η – dinamička viskoznost, [Pa s]

w – brzina strujanja fluida kroz izmjenjivač, [m/s]

ρ – gustoća fluida, [kg/m³]

b – razmak između dvije susjedne ploče izmjenjivača, [m]

Λ – faktor povećanja, $\Lambda = 1,10 \div 1,25$, [-]

Sve ove izraze uvrstila sam u program Excel te izračunala potrebne vrijednosti. U nastavku ću prikazati rezultate proračuna, do kojih se došlo iterativnim putem. Naime, proračun sam započela odabirom jednog od isparivača ponuđenih u katalogu proizvođača [9], te proračunom provjeravala da li on ima dovoljnu površinu izmjene topline za zadane uvjete.

10.3.1. Rezultati proračuna

Ekvivalentni promjer pločastog izmjenjivača, jednak na strani vode i na strani zraka:

$$d_e = \frac{2 \cdot 0,00223}{1,2} = 0,00372 \text{ mm}$$

Reynolds-ov broj za struju vode i za struju vlažnog zraka:

$$Re_{zr} = \frac{0,303 \cdot 0,00372 \cdot 1,0781}{0,000019607} = 61,92$$

$$Re_w = \frac{0,387 \cdot 0,00372 \cdot 999,8}{0,001398} = 1029,08$$

Nusselt-ov broj za struju vode i za struju vlažnog zraka:

$$Nu_{zr} = 0,25 \cdot 601,92^{0,65} \cdot 0,703^{0,33} \cdot \left(\frac{19,607}{1398}\right)^{0,12} = 1,948$$

$$Nu_w = 0,25 \cdot 1029,08^{0,65} \cdot 10,13^{0,33} \cdot \left(\frac{19,607}{1398}\right)^{0,12} = 29,208$$

Koeficijenti prijelaza topline na strani vode i na strani zraka:

$$\alpha_{zr} = \frac{1,948 \cdot 0,02774}{0,00372} = 14,55 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_w = \frac{29,208 \cdot 0,577}{0,00372} = 4534,54 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Koeficijent prolaza topline:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{14,55} + \frac{0,001}{14,6} + \frac{1}{4534,54}} = 14,48 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(373,15 - 288,15) - (281,15 - 280,15)}{\ln \frac{373,15 - 288,15}{281,15 - 280,15}} = 18,9\text{K}$$

Potrebna površina izmjene topline:

$$A = \frac{49,2275}{14,48 \cdot 18,9} = 0,1797 \text{ m}^2$$

Nakon što se izračuna potrebna površina za izmjenu topline, potrebno je odrediti broj ploča koje treba ugraditi u izmjenjivač topline. Naime, površina izmjene topline između dvije ploče je jednaka:

$$A' = 0,074 \cdot 0,204 = 0,0151 \text{ m}^2$$

Broj potrebnih ploča na izmjenjivaču N , dobit ćemo tako da potrebnu površinu izmjene topline podijelimo sa površinom izmjene topline između dvije ploče, te količnik pomnožimo s dva kako bi dobili stvarni broj ploča.

$$N = \frac{A}{A'} \cdot 2 = \frac{0,1797}{0,0151} \cdot 2 = 23,81 \rightarrow \text{odabrano 25 ploča}$$

Proračunom smo dobili dimenzije pločastog izmjenjivača kojeg ćemo koristiti u sustavu. Radi se o pločastom izmjenjivaču GEA GNS 100 sa 25 ploča i dimenzija koje su navedene u tablici 3.

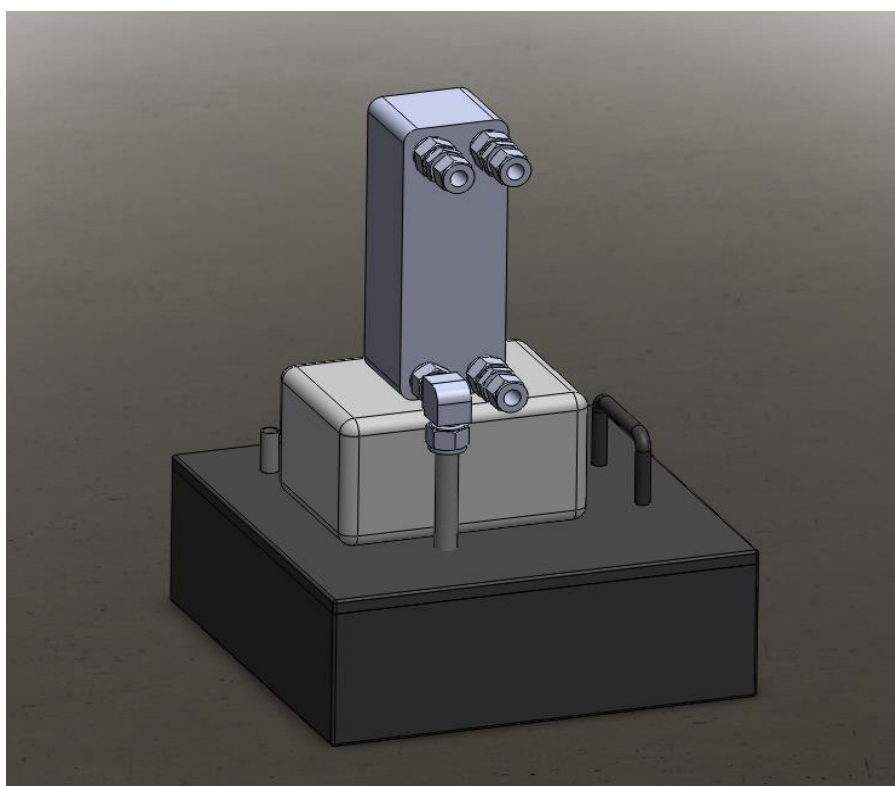
10.4. Implementacija kondenzatora (pločastog izmjenjivača) u sustav

Pločasti izmjenjivač GEA GNS 100 treba spojiti u sustav tako da se nakon generatora vlažnosti, vlažni zrak dovodi u pločasti izmjenjivač. Cjevovod i svi popratni spojevi kojima prolazi vlažni zrak trebaju biti grijani kako se vlaga iz zraka ne bi iskondenzirala i napravila štetu cijelom sustavu.

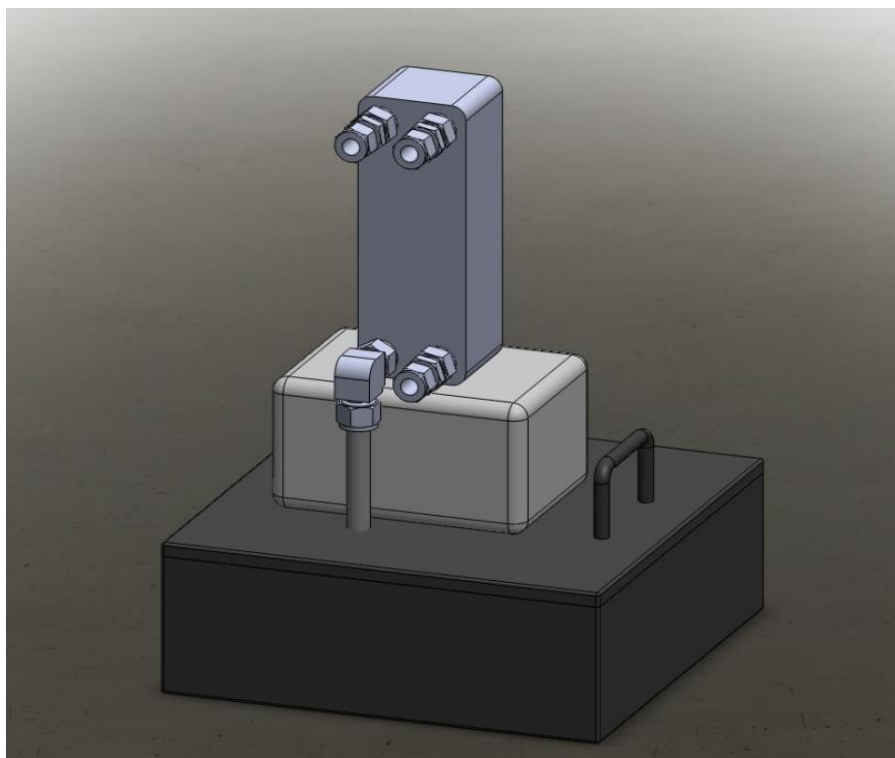
Struja vlažnog zraka ulazi u pločasti izmjenjivač gdje struji preko ploča izmjenjujući toplinu s vodom te izlazi iz izmjenjivača kao suhi zrak s vodom u kapljevitom stanju. Izmjenjivač je tako postavljen

(vertikalno u odnosu na podlogu) da će izkondenzirana voda isteći iz njega uslijed gravitacijske sile. Suhi zrak i voda se nakon pločastog izmjenjivača vode u posudu koja se nalazi ispod izmjenjivača i na kojoj izmjenjivač stoji, te će opet uslijed gravitacijske sile voda otići na dno posude, a suhi zrak kojemu je potrebno izmjeriti protok rotametrom, će se voditi kroz cijev koja ulazi u posudu s gornje strane. Takvom suhom zraku se sada može mjeriti protok rotametrom. Između izmjenjivača i posude predlaže se postavljanje stiropora na kojemu će stajati izmjenjivač i koji će biti dobar toplinski izolator. Spajanje izmjenjivača s cijevima izvedeno je pomoću Swagelok priključaka [11].

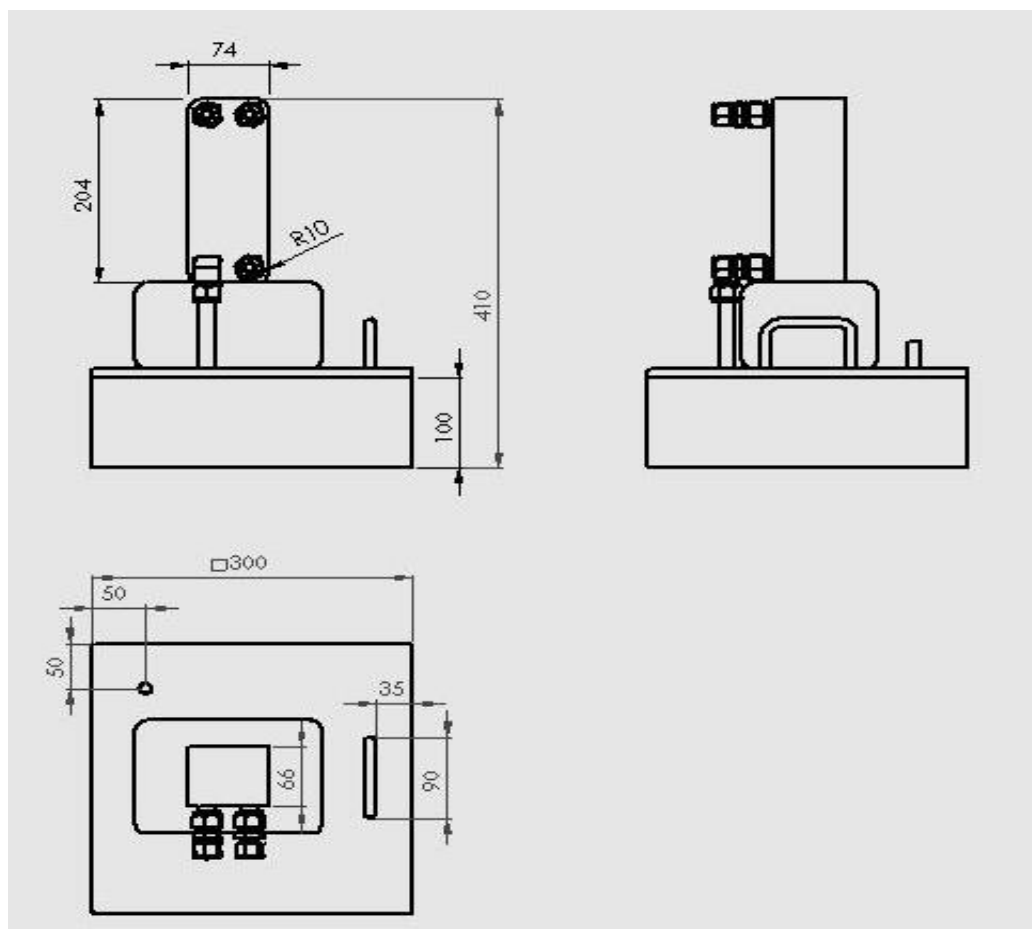
Na slijedećim slikama 23 i 24 biti će prikazan 3D model budućeg sustava. Također su na slici 25 prikazani nacrt, tlocrt i bokocrt budućeg sustava.



Slika 23 3D model budućeg sustava s pločastoim izmjenjivačem 1



Slika 24 3D model budućeg sustava s pločastim izmjenjivačem 2



Slika 25 Nacrt, tlocrt i bokocrt budućeg sustava

10.5. Opis sustava hlađenja struje vode

U ovom poglavlju bit će opisan i prikazan prijedlog sustava za hlađenje struje vode. Budući da je temperatura vode potrebne u izmjenjivaču niža od temperature okoline u prostoriji potrebno ju je hladiti. Predlaže se hlađenje vode termoelektričnim hladilom, koje bi trebalo ohladiti struju vode na $\vartheta_{w1} = 280,15 \text{ K}$. Sustav za hlađenje struje vode sastoji se od termoelektričnog hladila, pumpe i cjevovoda.

10.5.1. Proračun potrebne snage termoelektričnog hladila

Kako bi mogli odabrati odgovarajuće hladilo struje vode, potrebno je odrediti njegovu ukupnu potrebnu snagu. Naime, termoelektrično hladilo mora nadoknaditi toplinu dovedenu struji vode u pločastom izmjenjivaču te toplinu dovedenu struji vode kroz cijevi kroz koje struji voda od izmjenjivača prema hladilu uslijed manje temperature vode u odnosu na okoliš. U ovom krugu također imamo i pumpu kako bi osigurali protok vode kroz cijevi. Pumpa je odabrana na temelju željenog protoka vode kroz cijevi i on iznosi $q_{vw} = 3,833 \text{ l/min}$, te maksimalne visine dobave izabrane pumpe. Za sustav je odabrana centrifugalna pumpa proizvođača Cole-Parmer, parametara prikazanih u tablici 4. [12] Kao što je vidljivo iz parametara pumpe, ona zadovoljava uvjete koje treba osigurati u sustavu (maksimalni protok je veći od traženog te je i visina dobave veća od potrebne visine od 1,5 m). Toplinski dobitci od pumpe na struju vode su zanemarivo mali stoga se ne uzimaju u obzir.

Tablica 4 Parametri centrifugalne pumpe EW-72008-00

Tip	Centrifugalna pumpa EW-72008-00
Maks. protok [l/min]	4,2
Maks. visina dobave [m]	3
Maks. temp. fluida [K]	333,15
Dimenzije [cm]	9,4x7,6x7,6

Toplinu koje će se dovoditi vodi na izmjenjivaču znamo, izračunali smo je u prethodnom poglavlju te ona iznosi $Q_{kond} = 49,2275 W$. Nadalje, potrebno je izračunati toplinu dovedenu struji vode u cijevi, a nju ćemo izračunati uz pomoć izraza za konduktivne toplinske gubitke/dobitke kroz cijevi:

$$Q_{cijev} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{cijev} \cdot (\vartheta_o - \vartheta_u)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_u}\right)}$$

Gdje je:

Q_{cijev} – dovedena toplina struji vode kroz cijevi, [W]

L – duljina cijevi, [m]

k_{cijev} – koeficijent toplinske vodljivosti materijala, [W/mK]

ϑ_o – temperatura okoline, [K]

ϑ_u – temperatura struje vode u cijevi, [K]

r_o – vanjski polumjer cijevi, [m]

r_u – unutarnji polumjer cijevi, [m]

U tablici 5 bit će dani potrebni podaci za računanje toplinskih dobitaka struje vode kroz cijev. Cijev kroz koju ide struja vode od kondenzatora preko pumpe do termoelektričnog hladila, je od poliuretana, proizvođača Festo. Ovisno o tome koliki će biti toplinski dobitci kroz cijev, moguće ju je dodatno izolirati Aromaflex-om ili H-flex-om.

Tablica 5 Podaci potrebni za izračun toplinskih dobitaka struje vode kroz cijev

L, [m]	k_{cijev} , [W/mK]	ϑ_o , [K]	ϑ_u , [K]	r_o , [m]	r_u , [m]
1,2	0,03	298,15	280,15	0,006	0,004

Uvrštavanjem podataka u izraz za Q_{cijev} dobili smo iznos toplinskih dobitaka kroz cijev i oni iznose $Q_{cijev} = 10,041 W$. Sada možemo izračunati ukupnu snagu termoelektričnog hladila. Naime, $P_{hladilo} = Q_{kond} + Q_{cijev}$, te ona iznosi $P_{hladilo} = 59,269 W$.

TERMOELEKTRIČNI EFEKT

Termoelektrični efekt je direktna pretvorba temperaturne razlike u električni napon i obrnuto. Termoelektrični uređaj stvara napon kada postoji razlika u temperaturi na svakoj strani. Također, kada se uređaju primjeni neki napon, on će stvoriti temperaturnu razliku. Na atomskoj razini, temperaturni gradijent uzrokuje difuziju nositelja naboja s tople na hladnu stranu. Ovaj efekt se može koristiti za generiranje električne struje, mjerenje temperature ili da bi se promijenila temperatura. Budući da se smjer grijanja i hlađenja određuje polarnošću narinutog napona, termoelektrični uređaji se mogu koristiti kao regulatori temperature.

Peltier-ov hladnjak ili termoelektrična dizalica topline, je aktivna dizalica topline koja prenosi toplinu s jedne strane uređaja na drugu uz potrošnju električne energije, ovisno o smjeru struje.

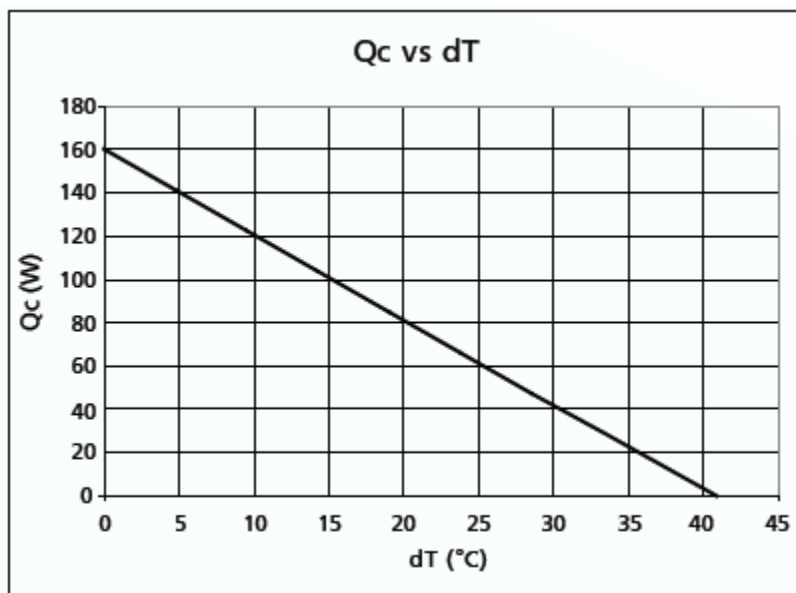
Prednosti korištenja termoelektričnih hladila su ta da nema rotirajućih dijelova, stoga je rjeđa potreba za održavanjem, može se osigurati kontrola temperature unutar jednog stupnja, relativno su malih dimenzija, mogu se koristiti u nepovoljnijim uvjetima od konvencionalnih hladnjaka, imaju dugi životni vijek (preko 100000 radnih sati) te se mogu regulirati mijenjanjem napona/jakosti struje. Nedostaci su im da mogu odvesti ograničenu količinu toplinskog toka, ograničeni su na primjene sa malim izmjenama topline te imaju manju efikasnost (COP) u odnosu na kompresorske sustave.

Termoelektrično hladilo koje je odabrano za ovaj sustav maksimalne je snage od 160 W. Naime, riječ je o hladilu LA PowerCool Series, LA-160-24-02, proizvođača Laird. [10] U tablici 6 dani su parametri tog termoelektričnog hladila.

Tablica 6 Parametri termoelektričnog hladila

Tip	LA-160-24-02
Snaga Q_{max} [W]	160
Jakost struje [A]	7,4
Maks. napon [V]	30
El. snaga [W]	178
Masa [kg]	3,5
Radna temp. [°C]	-10 do 46

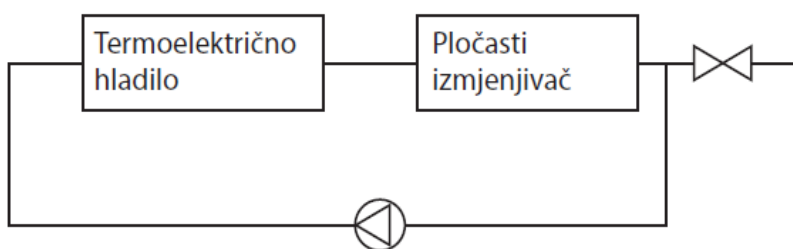
Iako bi maksimalna snaga od 160 W ovog termoelektričnog hladila bila i više nego dovoljna za savladavanje svih toplinskih dobitaka kroz sustav, javlja se problem vezan za termoelektrična hladila koji je već prethodno naveden. Efikasnost hladila uvelike ovisi o temperaturnoj razlici između okoliša i tražene temperature na koju se hladi struja vode. Ovisnost snage o toj temperaturnoj razlici prikazana je na slici 23.



Slika 26 Ovisnost snage hladila o temperaturnoj razlici

Iz gornjeg dijagrama je vidljivo da snaga hladila drastično opada s porastom temperaturne razlike. U našem najnepovoljnijem slučaju ta temperaturna razlika iznosi $\Delta T = 23^\circ\text{C}$ (naime $T_{\text{okoliš}} = 30^\circ\text{C}$, $T_w = 7^\circ\text{C}$), pri čemu je snaga hladila i dalje preko 60 W što je dovoljno za pokrivanje svih toplinskih dobitaka sustava.

Dakle, naš sustav za hlađenje struje vode sastojat će se od cijevi, pumpe i termoelektričnog hladila kao što je shematski prikazano na slici 24. Također je potrebno na najvišoj točki sustava staviti ventil kako bi se po potrebi mogla dodati voda.



Slika 27 Shematski prikaz sustava za hlađenje struje vode

11. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada bila je riješiti realni problem u Laboratoriju za toplinska i procesna mjerenja (LPM) gdje se vrše umjeravanja na generatorima vlažnosti (niskotemperaturnim i visokotemperaturnim). Zrak na izlazu iz visokotemperaturnog generatora vlažnosti jest ovlažen što otežava mjerenje protoka. Za svrhu mjerenja protoka koristi se rotametar u koji nipošto, u ovom slučaju, ne smije ući kapljevina, jer bi utjecala na točnost rezultata te je stoga prethodno potrebno kondenzirati svu vlagu iz tog vlažnog zraka.

U radu je predložen i proračunat sustav koji bi se koristio za kondenziranje vlage iz zraka. Postoji više mogućnosti kako se mogao riješiti ovaj problem te je u dogovoru s mentorom i razmatrajući ostale opcije izabrano optimalno rješenje za dane uvjete. Odabran je pločasti izmjenjivač koji će se koristiti kao kondenzator. Njegova primjena ima nekoliko prednosti; relativno je malen i kompaktan, gotov je proizvod koji samo treba naručiti od proizvođača te se može vrlo jednostavno odvojiti iz sustava i koristiti u neku drugu svrhu za kojom se pokaže potreba u laboratoriju. Za hlađenje struje vode odabrano je termoelektrično hladilo zbog njegovih prednosti poput kompaktnog dizajna, rjeđe potrebe za održavanjem, precizne kontrole temperature te regulacije promjenom napona/jakosti struje.

Pisanjem ovog rada susrela sam se sa stvarnim problemom u inženjerskoj praksi te sam morala uz pomoć mentora i znanja stečenih dosadašnjim studiranjem riješiti sve poteškoće koje su se pojavile tijekom razrade predloženog sustava. Pri razradi sustava analizirani su brojni scenariji koji bi se mogli ostvariti pri njegovom budućem korištenju, što je rezultiralo brojnim iteracijama i promjenama tijekom samog procesa. Zaključila bih da je izrada ovog rada bila veliko praktično iskustvo koje će mi biti od velike koristi kod budućeg zaposlenja.

LITERATURA

- [1] Wiederhold P. R., Water Vapor Measurement, New York, 1997.
- [2] Vuković M., Metrologija ukratko, 2. izdanje, 2008.
- [3] LPM-FSB, CPVL01 Calibration of dew-point hygrometers, 2009.
- [4] LPM-FSB, CPVL02 Calibration of relative humidity meters, 2005.
- [5] http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/MP09_MjerenjeVlageiMokrine.pdf
- [6] Bejan A., Kraus A. D., Heat transfer Handbook, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [7] Galović A., Termodinamika II, Zagreb, 2007.
- [8] Halasz B., Galović A., Boras I., Toplinske tablice, Zagreb, 2007.
- [9] GEA, GNS Series – Brazed plate heat exchangers
- [10] Laird Technologies, LA PowerCool Series, LA-160-24-02
- [11] <http://www.swagelok.com/>
- [12] Cole-Parmer, Pumps, Centrifugal, Magnetic drive